

**Die Verwendung virtueller 3D-Modelle
und quantitativer Untersuchungsmethoden
in der Archäoseismologie am Beispiel
der Archäologischen Zone Köln**

In a u g u r a l - D i s s e r t a t i o n

zur

Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Universität zu Köln

vorgelegt von

Stephan Schreiber

aus Wiesbaden

Köln 2012

Inhaltsverzeichnis

I. Danksagung

II. Kurzzusammenfassung

III. Abstract

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | Einleitung | 1 |
| 2. | Zielsetzung | 4 |
| 3. | Arbeitsgebiet | 6 |
| 4. | Laserscanning | 16 |
| 4.1 | Lasertechnik | 16 |
| 4.2 | Beeinflussende Faktoren der Laserdistanzmessung | 20 |
| 4.3 | Lasersicherheit | 22 |
| 4.4 | Entfernungsmessung mit einem Lasermesssystem | 23 |
| 4.5 | Geräte | 27 |
| 4.6 | Anwendungen | 30 |
| 4.7 | FARO PHOTON 80 | 32 |
| 4.7.1 | Datenerfassung | 36 |
| 4.7.2 | Datenaufbereitung | 37 |
| 4.7.3 | Datenbearbeitung | 42 |
| 4.8 | Datenauswertung und Schadensanalyse | 45 |
| 5. | Archäoseismologie in der Archäologischen Zone Köln | 52 |
| 5.1 | Die Archäologische Zone Köln | 52 |
| 5.2 | Das Praetorium und seine direkte Umgebung | 55 |
| 5.2.1 | Prätorium | 55 |
| 5.2.2 | Abwasserkanal | 83 |
| 5.3 | Der Rathausplatz | 92 |
| 5.3.1 | Porticus | 94 |
| 5.3.2 | Römischer Brunnen und Apsis | 101 |
| 5.3.3 | Synagoge und Kloake | 111 |
| 5.3.4 | Mikwe | 124 |
| 5.3.5 | Weitere Befunde | 134 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 6. | Ingenieurseismologische und geotechnische Modellierung | 138 |
| 6.1 | Geotechnisches Modell | 138 |
| 6.1.1 | Oberflächenmodell | 138 |
| 6.1.2 | Untergrundmodell | 141 |
| 6.1.3 | Erweitertes Untergrundmodell | 144 |
| 6.2 | Ingenieurseismologisches Modell | 158 |
| 6.2.1 | Seismotektonisches Modell | 158 |
| 6.2.2 | Modellierung von Schadensszenarien | 164 |
| 7. | Zusammenfassung der Ergebnisse | 178 |
| 8. | Diskussion und Fazit | 181 |
| 9. | Literaturverzeichnis | 185 |
| 10. | Daten und Ressourcen | 199 |

Anhang A und B

Anlagen I-III

- i. Erklärung**
- ii. Lebenslauf**

Berichterstatter: Prof. Dr. K.-G. Hinzen

Prof. Dr. M. Melles

Tag der mündlichen Prüfung: 30.01.2012

I. Danksagung

Im Folgenden möchte ich einigen Personen für die Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit danken.

Herrn Prof. Dr. Klaus-G. Hinzen für die Anregung der Arbeit, die ausführliche Betreuung sowie die interessanten Diskussionen zu archäoseismologischen Fragestellungen.

Herrn Dr. Sven Schütte M.A., der die Arbeiten in der Archäologischen Zone Köln ermöglicht hat, für die stete Diskussionsbereitschaft.

Herrn Dipl.-Ing. Claus Fleischer für seinen Einsatz bei den Feldarbeiten sowie die Unterstützung bei technischen Fragestellungen.

Frau Katja Kliemann M.A. und Herrn Michael Wiehen M.A. für die Unterstützung bei archäologischen Fragen sowie allen Mitarbeitern der Archäologischen Zone Köln für die Unterstützung bei den Feldarbeiten und die vielen Diskussionen.

Herrn Dipl.-Geol. Sebastian Rosellen für die Diskussionen über die Laserscanningtechnik, Frau Dipl.-Geol. Isabel Wiosna und Herrn Dipl.-Geol. Michael Wegner für die gute Zusammenarbeit im Projekt zur Archäologischen Zone, Frau Helen Kehmeier für die Anregungen und Tipps bei der Literaturrecherche sowie Frau Dr. Sharon K. Reamer, Herrn Gregor Schweppe und Herrn Dipl.-Geol. Klaus Weber für die stete Diskussionsbereitschaft.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Koen Verbeeck, Herrn Dr. Kris Vanneste, Frau Prof. Tina Niemi Ph.D. und Herrn Prof. Dr. Shmulik Marco für die Diskussionen über die Sedimentabfolgen in der Archäologischen Zone Köln bedanken.

Die Untersuchungen zu dieser Arbeit wurden durch das DFG finanzierte Projekt „Investigation of the Hypothesis of a Seismogenic Origin for the Structural Damages to Buildings in the Archeological Zone Cologne with Engineering-Geophysical Models“, (HI 660/2-1) ermöglicht.

Des Weiteren möchte ich mich bei meiner Familie für die moralische und finanzielle Unterstützung während meines gesamten Studiums bedanken. Ein weiterer Dank gilt Frau Dipl.-Geol., Dipl.-Biol. Susanne Höfer und Herrn Lukas Höfer für die liebevolle und geduldige Unterstützung in den letzten Jahren.

II. Kurzzusammenfassung

Die Archäoseismologie hat sich in den letzten Dekaden zu einem eigenen, multidisziplinären Wissenschaftszweig entwickelt. Durch die Weiterentwicklung von quantitativen Methoden wurden der Archäoseismologie zudem neue Werkzeuge zur Verfügung gestellt.

In der vorgestellten Studie wurde der multidisziplinäre Ansatz weiterentwickelt und neue quantitative Methoden, insbesondere die Schadensauswertung basierend auf virtuellen 3D-Modellen und numerische Modellierungen zur Plausibilitätsabschätzung von Schadensszenarien, wurden auf das Beispiel der Archäologischen Zone Köln angewendet.

Während der Einrichtung dieses unterirdischen Museumskomplexes in der historischen Altstadt von Köln, wurden bei Grabungen Reste der römischen und mittelalterlichen Bebauung freigelegt. In einem 150 x 200 m großen Areal zeigen die neu ergrabenen Gebäudereste und Gebäude die schon in der 1950er Jahren freigelegt wurden, strukturelle Gebäudeschäden. Hinzen und Schütte (2003) haben Teile der Schäden an den in den 1950er Jahren freigelegten Fundamenten des römischen Statthalterpalastes (Praetorium) untersucht und einen möglichen seismogenen Ursprung der Schäden vermutet. Durch die derzeitigen Grabungen ergibt sich die Möglichkeit die Erdbebenhypothese und mögliche alternative Schadensursachen mit Hilfe von neuen quantitativen Methoden in einem multidisziplinären Ansatz zu untersuchen. Auf Grundlage der Kartierung des Gebäudebestandes mit einem Phasenlaserscanner konnten virtuelle 3D-Modelle der archäologischen Befunde erstellt werden. Anhand dieser Modelle wurden die Gebäudeschäden identifiziert, klassifiziert, lokalisiert und quantifiziert. Die Ergebnisse der Schadensanalyse wurden in einer Datenbank zusammengefasst. Die strukturellen Gebäudeschäden wurden in dieser Studie mit simulierten Schadensszenarien verglichen. Der Großteil der Schäden deutet auf Bewegungen im Baugrund der Archäologischen Zone hin, die nicht notwendiger Weise durch Erschütterungen während eines Erdbebens verursacht wurden. Neben der Kartierung der Gebäudeschäden wurden der lokale Baugrund und die Topographie des Arbeitsgebietes untersucht. Diese Untersuchungen zeigen, dass die Gebäude in der Archäologischen Zone auf einem sehr komplexen Untergrund, nahe der Kante eines Hanges zu einem ehemaligen Seitenarm des Rheins errichtet wurden. Diese Situation wurde vereinfacht und unter Verwendung vorhandener und neu erhobener Daten auf ein geotechnisches Untergrundmodell des Arbeitsgebietes übertragen. Das resultierende Finite-Element-Modell wurde zur Plausibilitätsabschätzung von Schadensszenarien genutzt. Neben der statischen Hangstabilität wurde das Verhalten des Hanges unter seismischer Belastung sowie der Einfluss von Niederschlagswasser auf den Baugrund untersucht. Für die Berechnungen des Verhaltens unter dynamischer Belastung wurden synthetische Seismogramme für 16 Erdbebenszenarien genutzt, die standortspezifisch auf Grundlage eines seismotektonischen Modells der Region berechnet wurden. Die Wirkung von Niederschlagsereignissen wurde mit einem hydrologischen Modell des Untergrundes untersucht. Grundlage ist das Bemessungsregenereignis für die Stadt Köln mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren. Die Ergebnisse der Modellrechnungen unter statischer und dynamischer Belastung haben gezeigt, dass die Hangstabilität sowohl im statischen Lastfall als auch unter Erdbebenbelastung gegeben ist. Die hydrologischen Modellrechnungen haben gezeigt, dass Niederschlagswasser in Bereiche mit kohäsionslosen Sanden versickern und dort Untergrunderosion verursachen kann. Die Ergebnisse der Schadensanalyse und der numerischen Modellierungen sowie die archäologische Situation im Arbeitsgebiet zeigen, dass Erosionsprozesse im Untergrund eine plausible Erklärung für die beobachteten Schäden sind.

III. Abstract

Within the last decades, archaeoseismology has emerged to an independent, multidisciplinary branch of science. The further development of quantitative methods offered new tools to the archaeoseismology. The present study enhances the multidisciplinary approach and new quantitative methods, in particular the damage analysis based on virtual 3D-models and the numerical modeling of damage scenarios, are applied to examples from the Archaeological Zone Cologne. During the construction of this underground museum in the historic center of Cologne, parts of the Roman and medieval city were excavated. These newly excavated remains and remains of the Roman city, which were already excavated in the 1950's, exhibit structural damages over an area of ca. 150 x 200 m. Hinzen and Schütte (2003) described parts of these damages on the previously excavated Roman palace (Praetorium) and proposed the possibility of a secondary seismogenic origin in terms of a destabilized building ground during an earthquake. The current excavations offered the possibility to further test this hypothesis and other possible causes for the damages using quantitative methods. The first part of the study was the mapping of the archaeological remains using a phase based 3D-laserscanner. The resulting 3D-models were used to identify, classify, locate and quantify the damages. The results of this analysis were merged into a damage database. The building damages were compared to modeled damage scenarios. Movements in the subsurface caused by a sudden failure of the construction ground are sufficient to explain most of the damages and seismic ground motions and hydrological effects as their possible cause were further studied. In addition to the mapping of the damages, investigations on the local construction ground and the topography of the area were made. The investigations showed that the buildings were founded on poor construction ground on top of a slope to a former side arm of the Rhine River. These conditions were simplified and assigned to a geotechnical subsurface model. This finite element model was used to test the slope stability under static and dynamic loading and to test the influence of precipitation water. For the calculations of the behavior of the slope under dynamic loading, 16 earthquake scenarios were defined. Seismograms were calculated based on a seismotectonic model of the region. The influence of precipitation water on the construction ground was tested using a rain event with a recurrence interval of 100 years, based on meteorological data for Cologne. The results of the calculations under static and dynamic loading showed that the static stability of the slope is given and that permanent deformation of the slope does not occur during the tested earthquake scenarios. The results of the hydrological calculations showed that precipitation water seeps into regions of loose sands in the underground and possibly causes subsurface erosion.

The damage analysis and the results of the numerical modeling together with the archaeological situation of the investigation area show that movements in the construction ground caused by erosion processes are a plausible explanation for the observed damages.

1. Einleitung

Mit der Einrichtung einer „Archäologischen Zone“ und dem Beginn der Ausgrabungen auf dem Rathausplatz in Köln im Jahre 2007 ergab sich die Möglichkeit in einem multidisziplinären Projekt strukturelle Schäden, die schon bei ersten Grabungen in den 1950er Jahren entdeckt wurden, an Gebäuden aus 2000 Jahren der Kölner Stadtgeschichte zu untersuchen.

Hinzen und Schütte (2003) haben schon vor knapp zehn Jahren bei der Untersuchung von Teilen der strukturellen Bauwerksschäden am bereits ergrabenen Teil des römischen Statthalterpalastes (Praetorium) die Hypothese eines seismogenen Ursprungs dieser Schäden formuliert. Durch die Kartierung der neu eingerichteten Archäologischen Zone mit einem 3D-Phasenlaserscanner konnte diese Hypothese nun in einer archäoseismologischen Studie auf Grundlage einer erweiterten Datenbasis mit quantitativen Methoden überprüft werden.

Die Archäoseismologie ist eine Unterdisziplin der klassischen Seismologie. In den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts wurde mit der Einführung einer instrumentellen Erdbebenskala (Richter, 1935) der Grundstein für die systematische, einheitliche, instrumentelle Aufzeichnung von Erdbeben gelegt. In den folgenden Jahrzehnten wurde das Wissen über Erdbebenmechanismen und seismische Wellen immer weiter vertieft. Allein der Zeitraum der durch detaillierte, instrumentelle Daten abgedeckt wird bleibt zu kurz um gesicherte Aussagen über mögliche Maximalmagnituden und Wiederkehrzeiten, insbesondere in Regionen mit geringer oder moderater Seismizität, treffen zu können. Um weitere Erkenntnisse über präinstrumentelle Erdbeben zu gewinnen hat sich die Seismologie zusätzliche Quellen erschlossen. Die historische Seismologie beschäftigt sich mit Erdbeben die zwar nicht instrumentell aufgezeichnet wurden, über die jedoch in historischen Quellen berichtet wird. Die historische Seismologie kann, je nach Region, einen Zeitraum von über 2000 Jahren (Mittelmeerraum) abdecken. Eine weitere Disziplin, die sich mit der Untersuchung von präinstrumentellen Erdbeben befasst ist die Paläoseismologie. Die Paläoseismologie untersucht Spuren von Erdbeben in der Landschaft bzw. in der geologischen Stratigraphie. Abbildung 1.1 zeigt einen Überblick über die Zeitspannen, die von den verschiedenen Disziplinen der Seismologie abgedeckt werden.

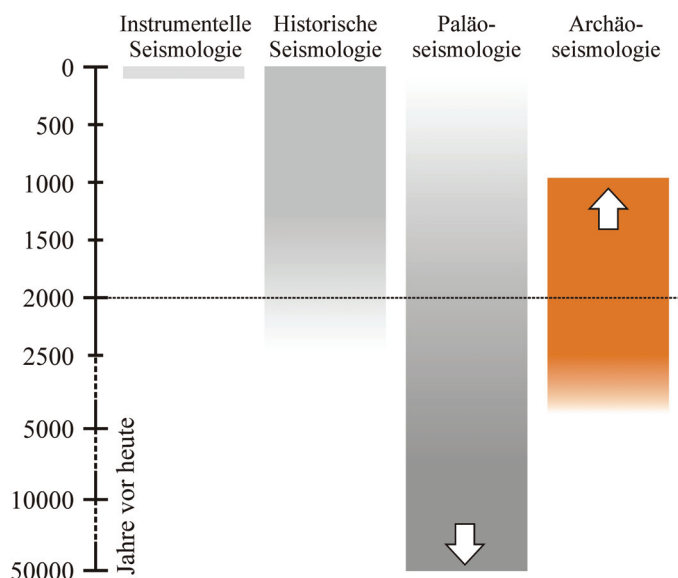


Abbildung 1.1: Zeitliche Reichweiten der verschiedenen Disziplinen der Seismologie (nach Galadini et al., 2006).

Abbildung 1.1 verdeutlicht, dass besonders im Zeitraum zwischen ca. 1000 und 2500 Jahren vor heute die Archäoseismologie die Datenlage entscheidend erweitern kann. Die historische Quellenlage nimmt in diesem Zeitraum ab, während paläoseismologische Untersuchungen in diesem Zeitbereich meist mit Problemen der Datierungsgenauigkeit konfrontiert sind (Galadini et al., 2006). In diesem Zeitbereich kann die so genannte Archäoseismologie helfen die Datenlage, durch die Untersuchung von Spuren, die Erdbeben in der Vergangenheit an menschlichen Konstruktionen und Gebäuden hinterlassen haben, zu verbessern.

Hinzen (2010) definiert die Archäoseismologie in der Encyclopedia of Solid Earth Geophysics als: „the study of pre-instrumental earthquakes that, ..., have left their mark in ancient structures uncovered by means of archaeological excavations or pertaining to the monumental heritage“. Als erste archäoseismologische Untersuchungen können Arbeiten von u.a. Schliemann (1881) und Evans (1928) angesehen werden. In diesen Studien waren es meist Archäologen, die Erdbeben als Erklärung für Schadenshorizonte oder bauliche Anomalien im archäologischen Inventar heranzogen. Erste moderne archäoseismologische Untersuchungen wurden seit den 1980er Jahren durchgeführt (u.a. Karcz und Kafri, 1978; Nikonov, 1988; Rapp, 1986; Ambraseys, 1996; Jones und Stiros, 2000). Hier waren es neben Archäologen auch Naturwissenschaftler, die sich aus der Perspektive ihres Fachgebietes einer archäoseismologischen Fragestellung näherten. Meist fehlte jedoch ein multidisziplinärer Ansatz der Methoden und Kenntnisse aus verschiedenen Fachgebieten kombiniert. Ein weiteres Problem archäoseismologischer Untersuchungen war der beschreibende Charakter der Studien. Es wurden zwar qualitativ Schäden beschrieben und mit einem möglichen seismogenen Ursprung in Verbindung gebracht, es fehlten jedoch Methoden um die beschriebenen Schäden auch zu quantifizieren. Die Anwendung von quantitativen Methoden in der Archäoseismologie nimmt in den letzten Jahren immer weiter zu (u.a. Psycharis et al., 2003; Fäh et al., 2006; Psycharis, 2007; Kamai und Hatzor, 2008; Hinzen, 2009; Hinzen und Weiner, 2009). Ein Überblick über Studien mit multidisziplinären und/oder quantitativen Ansätzen wird in Hinzen et al. (2011a) gegeben.

In der hier vorgelegten Arbeit werden Schäden an den römischen und mittelalterlichen Bauwerken in der Kölner Altstadt mit einem multidisziplinären, quantitativen und ergebnisoffenen Ansatz untersucht.

Parallel zu dieser Studie wurden in verschiedenen anderen Projekten Methoden (z.B. Laserscanning) aus dieser Arbeit überprüft sowie Techniken und Arbeitsabläufe die auf den Erfahrungen aus dieser Studie beruhen angewendet bzw. erweitert.

Im Südwesten der Türkei wurde eine archäoseismologische Studie in der lykischen Stadt Pinara durchgeführt. In dieser Studie wurden ein römisches Amphitheater, ein lykischer Sarkophag, ein römisches Grabhaus sowie weitere Strukturen mit einem 3D-Laserscanner kartiert. Die Daten wurden zur quantitativen Schadensauswertung und als Grundlage für numerische Modelle der einzelnen Strukturen verwendet. Die Ergebnisse der archäoseismologischen Untersuchungen können den Veröffentlichungen von Hinzen et al. (2010), Hinzen et al. (2011b), Yerli et al. (2011) und Hinzen et al. (2011c) entnommen werden.

In Zusammenarbeit mit dem Landschaftsverband Rheinland wurde die Nutzung von dreidimensionalen Modellen zu Präsentationszwecken evaluiert. Hierzu wurde der Bereich der Orangerie des Schloss Homburg bei Nümbrecht mit einem 3D-Laserscanner kartiert. Die Daten wurden genutzt um ein dreidimensionales, farbiges Modell des Bereiches zu erstellen.

Die Anwendbarkeit der Laserscantechnik für geologische Fragestellung wurde in Zusammenarbeit mit der Ludwig-Maximilian-Universität München in einem paläoseismologischen Schurf bei Untermaubach in der Nähe von Düren überprüft (Kübler et al., 2010).

2. Zielsetzung

Ziel der vorgelegten Arbeit war die Durchführung einer archäoseismologischen Studie in der historischen Altstadt von Köln. Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Arbeitschema erstellt und evaluiert, das quantitative Methoden und einen standortspezifischen Ansatz kombiniert. Neben den naturwissenschaftlichen Erkenntnissen der Untersuchung sollten mit den gewählten Methoden die archäologischen Arbeiten unterstützt werden. Die Datengrundlage wurde durch die dreidimensionale Kartierung aller zugänglichen archäologischen Befunde im Arbeitsgebiet mit einem 3D Phasenlaserscanner geschaffen. Ausgehend von diesen Daten erfolgte eine quantitative Auswertung von Gebäudeschäden, die zuvor anhand der 3D Modelle identifiziert wurden. Die Ergebnisse dieser Auswertung wurden in einer Schadensdatenbank aller Befunde im Arbeitsgebiet zusammengefasst. Neben der Untersuchung des archäologischen Inventars wurden bestehende Informationen über die Topographie, den Untergrund und die regionale seismotektonische Situation zusammengefasst und erweitert. Anhand der gesammelten Informationen wurde ein zweidimensionales Finite-Elemente Modell des Untergrundes des Arbeitsgebietes erstellt bzw. erweitert. Dieses Modell diente der Plausibilitätsabschätzung verschiedener Schadensszenarien.

Neben der statischen Standsicherheit des Modells, wurde das Verhalten unter dynamischer Belastung überprüft. Als Anregung wurden Zeitverläufe der horizontalen und vertikalen Beschleunigung von berechneten Erdbebenszenarien in der Region genutzt.

Zudem sollten weitere mögliche Faktoren (z.B. Oberflächenwasser) evaluiert und deren Einwirkung auf das Modell überprüft werden. Durch die angewendeten quantitativen Methoden basieren die Ergebnisse auf einem breiten Datenfundament.

Als quantitative Methoden werden Arbeitsmittel und Methoden bezeichnet, die zusätzlich zur qualitativen Bewertung eine quantitative Auswertung eines Sachverhaltes anhand von numerischen Datensätzen zulassen. Hinzen et al. (2011a) haben exemplarisch ein Arbeitsschema für quantitative, archäoseismologische Untersuchungen vorgestellt (Abb. 2.1).

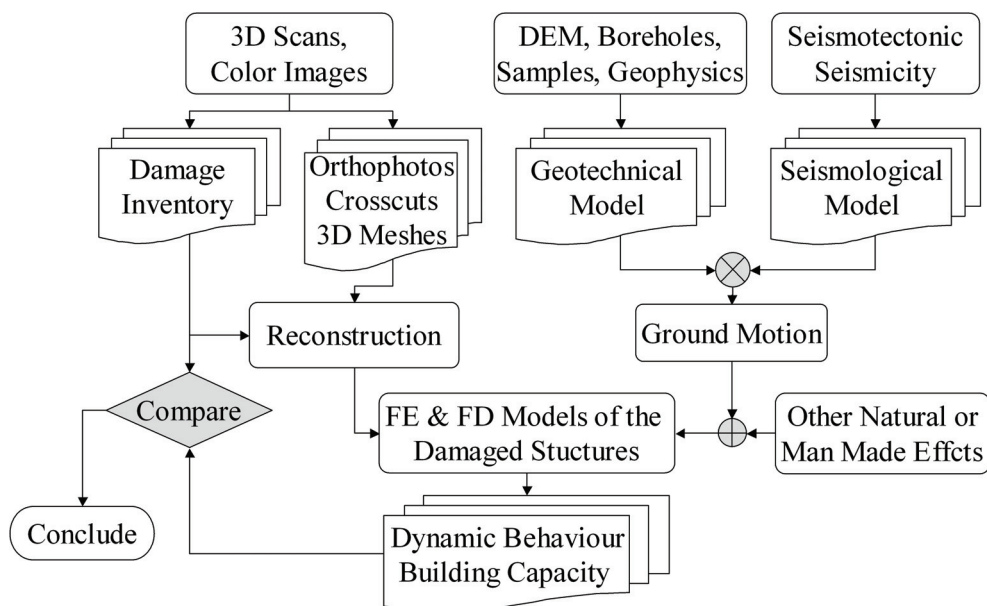


Abbildung 2.1: Arbeitsschema einer quantitativen archäoseismologischen Untersuchung (Hinzen et al., 2011a).

Dieses Arbeitsschema besitzt drei Grundpfeiler, die als Basis für alle weiteren Untersuchungen dienen. Neben der detaillierten Untersuchung des archäologischen Befundes werden durch die Untersuchung des Arbeitsgebietes und der regionalen Verhältnisse Bezüge zu den geologischen und seismologischen Gegebenheiten hergestellt.

Auf Grundlage der gesammelten Daten lassen sich durch numerische Modelle verschiedene Schadensszenarien simulieren. In diese Modelle sollten alle für den jeweiligen Standpunkt möglichen Schadensursachen integriert werden. Wurden alle Szenarien berücksichtigt, lassen sich nun durch die Bewertung der Ergebnisse Rückschlüsse auf die Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Schadensursachen schließen. Um auch im Falle der hier vorgestellten Untersuchungen dem vorgeschlagenen multidisziplinären Ansatz folgen zu können, musste eine standortspezifische Anpassung an das Arbeitsgebiet in der Archäologischen Zone Köln erfolgen. Das angepasste Schema (Abb. 4.2) baut auf vier Grundpfeilern auf:

- (1) Analyse des Gebäudebestandes
- (2) Untersuchung der Topographie
- (3) Erkundung des Untergrundes im Arbeitsgebiet
- (4) Einordnung des Arbeitsgebietes in den regionalen seismotektonischen und geologischen Kontext.

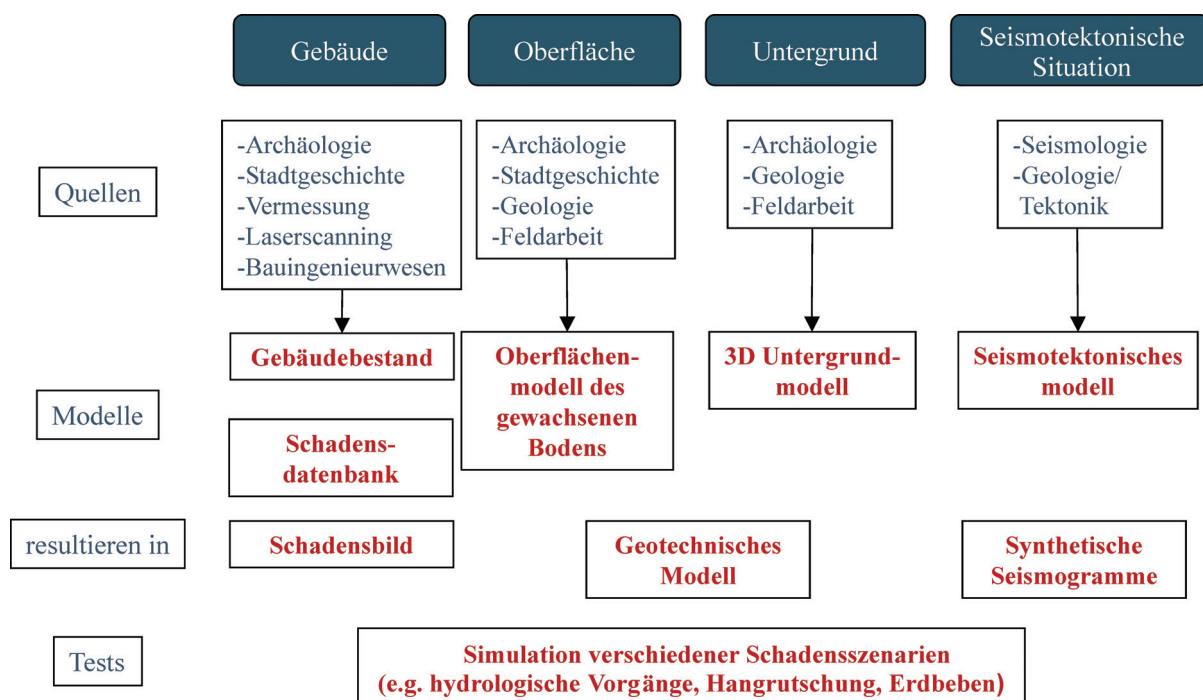


Abbildung 2.1: Arbeitsschema für die vorgestellte Studie in der Archäologischen Zone Köln.

Jeder der Grundpfeiler des Arbeitsschemas basiert auf der Anwendung von quantitativen Methoden. Die Analyse des Gebäudebestandes basiert auf den Daten, die bei der Kartierung des archäologischen Inventars mit einem 3D-Laserscanner aufgezeichnet wurden. Bei den Untersuchungen der Topographie und der Untergrundzusammensetzung wurden Bohrungen, Felduntersuchungen, bestehende Höhendatensätze und Daten zum Aufbau des Untergrundes genutzt. Die Einordnung des Arbeitsgebietes in den regionalen seismotektonischen und geologischen Kontext resultiert in einem seismotektonischen Modell. Mit dieser Datengrundlage können numerische Modelle für die Überprüfung verschiedener Schadensszenarien erstellt werden.

3. Arbeitsgebiet

Das Arbeitsgebiet der hier vorgelegten Studie befindet sich im Altstadtbereich von Köln (Nordrhein-Westfalen). Köln hat als viertgrößte deutsche Stadt eine Einwohnerzahl von 1.020.303 (Stand: 31.12.2009, Stadt Köln) und erstreckt sich über eine Fläche von 405 km² (Stadt Köln, 2011).

GESCHICHTLICHER ÜBERBLICK

Die erste stadtähnliche Siedlung auf dem Gebiet des heutigen Kölns war das um 38 v. Chr., spätestens jedoch 19 n. Chr., gegründete Oppidum Ubiorum (Wolff, 2000). Es handelte sich um eine Siedlung der Ubier, die auf Bestreben des römischen Statthalters von Gallien aus ihren ehemaligen Siedlungsgebieten im rechtsrheinischen Germanien auf die westliche, von Rom kontrollierte, Rheinseite umgesiedelt wurden (Heinrichs, 1996). Damit stand Köln seit Beginn der Stadtgeschichte unter römischem Einfluss. 50 n. Chr. wurde das Oppidum Ubiorum auf Drängen der in Köln geborenen Agrippina der Jüngeren, der Tochter des Germanicus und Gattin von Kaiser Claudius, in den Stand einer römischen Kolonie erhoben und erhielt somit den Namen Colonia Claudia Ara Agrippinensium (Tacitus, um 120 n.Chr.). Die Änderung des Status der Stadt bildete den Grundstein für die Entwicklung von Köln zu einer der bedeutendsten Städte des Römischen Reiches nördlich der Alpen. Um 90 n. Chr. wird Köln Hauptstadt der römischen Provinz Niedergermanien (Wolff, 2000). Im römischen Köln lebten ca. 20.000 Einwohner auf einer Fläche von 97 ha (Stadt Köln, 2010). Das Ende der Römerherrschaft wurde mit dem Frankenüberfall von 355 n. Chr. eingeleitet. Zwar wurde die Stadt von dem späteren Kaiser Julian zurückerobert, der römische Einfluss wurde jedoch kontinuierlich geringer. 455 n. Chr. wurde Köln endgültig von den Franken erobert und zur fränkischen Hauptstadt ernannt (Gechter und Schütte, 2000). Detailliertere Ausführungen zur römischen Besiedlungsgeschichte im Bereich des Rathausplatzes von Köln können den Kapiteln 5.2 und 5.3 entnommen werden.

In der Folgezeit war Köln Sitz der merowingischen Könige und der fränkischen Hausmeier (Gechter und Schütte, 2000). Erst zur Zeit Karl des Großen kam es in Köln zu einer Umverteilung der Macht vom König auf den Bischof und Karl der Große siedelte dauerhaft nach Aachen um. In der Folgezeit war Köln immer wieder Teil innerfränkischer Konflikte, bis um 1000 Erzbischof Brun zunächst die geistliche Macht, später auch die weltliche Macht übernahm und damit den Beginn einer bischöflichen Herrschaftsperiode in Köln markierte. 1288 befreiten sich die Kölner Bürger in der Schlacht von Worringen von der kirchlichen Herrschaft und Köln wurde Reichsstadt, wobei dieser Status erst 1475 offiziell bestätigt wurde. Bis 1400 stieg Köln zur größten Stadt des heiligen Römischen Reiches Deutscher Nation auf. Köln hatte zu dieser Zeit ca. 40.000 Einwohner. Während dieser Episode entwickelte sich Köln zu einer der führenden Städte in der Hanse. Der Status Kölns als freie Reichsstadt endete mit der Besetzung durch französische Truppen im Jahr 1794. In der Folge gehörte Köln bis 1814 zu französischem Staatsgebiet (van Eyll, 1991).

Mit dem Wiener Kongress wurde Köln 1815 Preußen zugesprochen. 1816 lebten in Köln knapp 50.000 Menschen auf einer Fläche von 770 ha (Stadt Köln, 2010). Unter der preußischen Führung entwickelte sich die Bevölkerungszahl in Köln rapide. 1830 lag die Bevölkerungszahl bei 63.600 Einwohnern, 1840 bei 75.858 Einwohnern, 1850 bei 95.500 Einwohnern. In den folgenden zehn Jahren überschritt die Einwohnerzahl die Marke von 100.000 Einwohnern, wodurch Köln offiziell zur Großstadt wurde. 1860 lebten bereits

117.700 Menschen auf einer Fläche von 770 ha (Stadt Köln, 2010). Der Bevölkerungszuwachs in Köln hielt bis zum zweiten Weltkrieg an. 1939 lebten 768.293 Menschen in Köln. 1945 waren es nur noch 246.300. Während des zweiten Weltkrieges wurden 90 – 95 % der Kölner Altstadt bzw. 70 % der Gesamtstadt zerstört. In den Nachkriegsjahren erholte sich die Bevölkerungszahl und 1975 wurde Köln erstmals Millionenstadt. Dieser Status ging 1982 wieder verloren. Seit 1990 hat Köln jedoch nach offiziellen Quellen durchgängig über 1.000.000 Einwohner (Stadt Köln, 2010).

GEOGRAPHISCHER ÜBERBLICK

Köln liegt im Osten der Niederrheinischen Bucht im Westen Deutschlands (Abb. 3.1). Die Niederrheinische Bucht ist ein junges Senkungsgebiet, das im Westen von den Ardennen und der Nordeifel, im Osten durch das Bergische Land und im Süden durch das Rheinische Schiefergebirge begrenzt wird. Nach Norden öffnet sich die Niederrheinische Bucht in das Niederrheinische Tiefland (Walter, 1992). Im Südosten der Niederrheinischen Bucht bei Bonn verlässt mit dem Rhein der Fluss mit der längsten Fließstrecke in Deutschland das Rheinische Schiefergebirge.

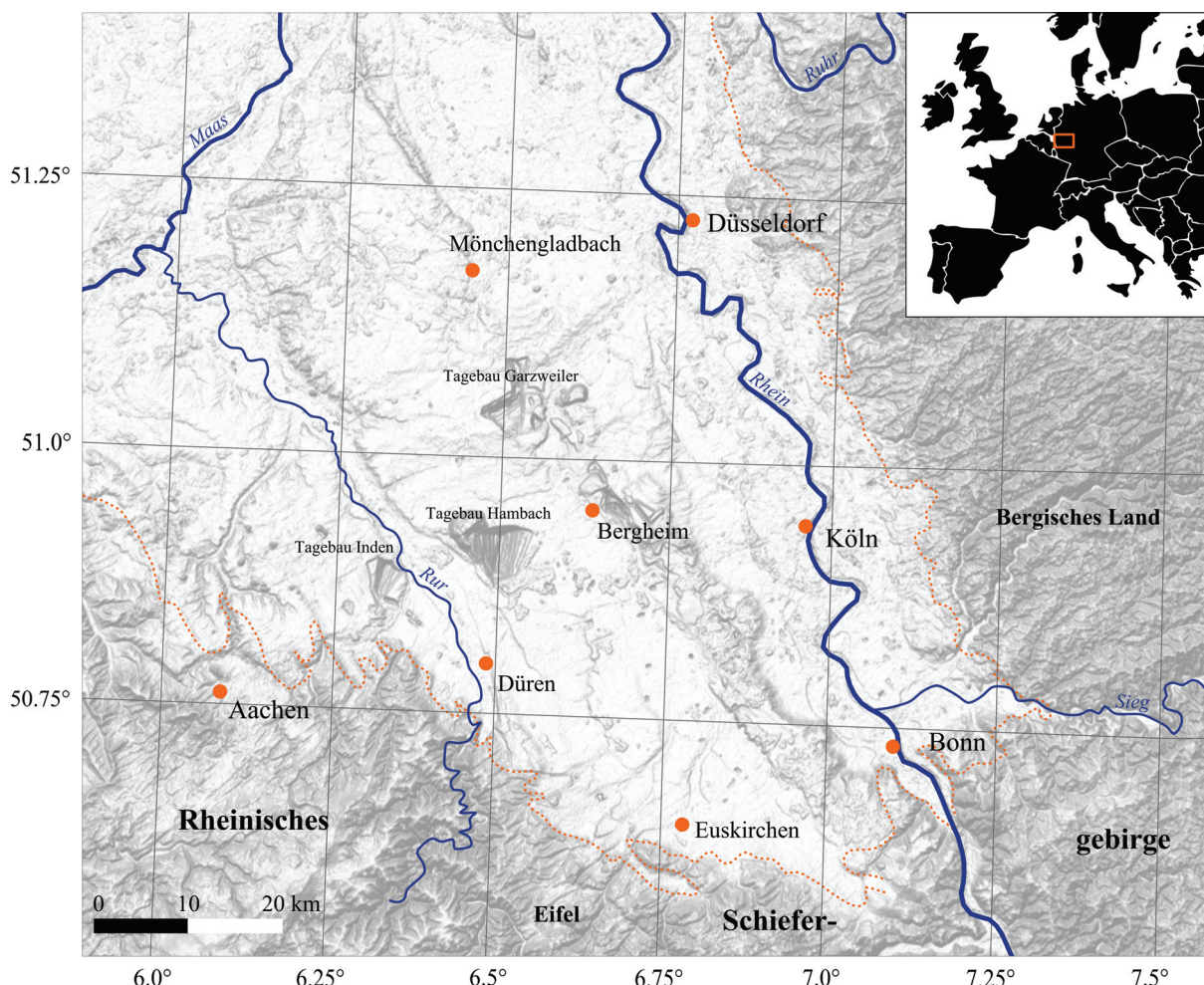


Abbildung 3.1: Übersichtskarte der Niederrheinischen Bucht im Westen von Deutschland. Die gestrichelte Linie zeigt die Grenze der Niederrheinischen Bucht. Die Karte in der rechten, oberen Ecke zeigt die Lage in Westeuropa. (Höhenmodell: NASA, <http://srtm.usgs.gov>, Europakarte: www.openclipart.org)

Der Rhein prägt mit seiner heutigen Flussebene den östlichen Teil der Niederrheinischen Bucht, war jedoch auch untrennbar an der geologischen Entwicklung des Untergrundes

beteiligt. Die Morphologie ist durch Bruchtektonik geprägt, die im Kapitel 6.2.1 beschrieben wird. Klimatisch wird der Kölner Raum nach N. Creuzburg in die ständig feuchte, gemäßigte Klimazone eingeteilt (Blüthgen und Weischet, 1980). Köln befindet sich im Übergangsbereich von maritim zu kontinental geprägtem Klima. Das Klima in Köln ist durch milde Winter und gemäßigte Sommer geprägt. Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 10.5° - 11.2° (LANUV, 2010). Der mittlere Jahresniederschlag liegt bei knapp 800 mm (LANUV, 2010). Genauere Informationen über spezielle Niederschlagsereignisse können Kapitel 6.2.2 entnommen werden.

Das Arbeitsgebiet in der Kölner Altstadt erstreckt sich von der „Kleinen Budengasse“ im Norden bis zu den „Obenmarspforten“ im Süden. Im Osten wird das Arbeitsgebiet von der „Bürgerstrasse“ und der „Judengasse“ und im Westen von der Strasse „Unter Goldschmied“ begrenzt (Abb. 3.2).

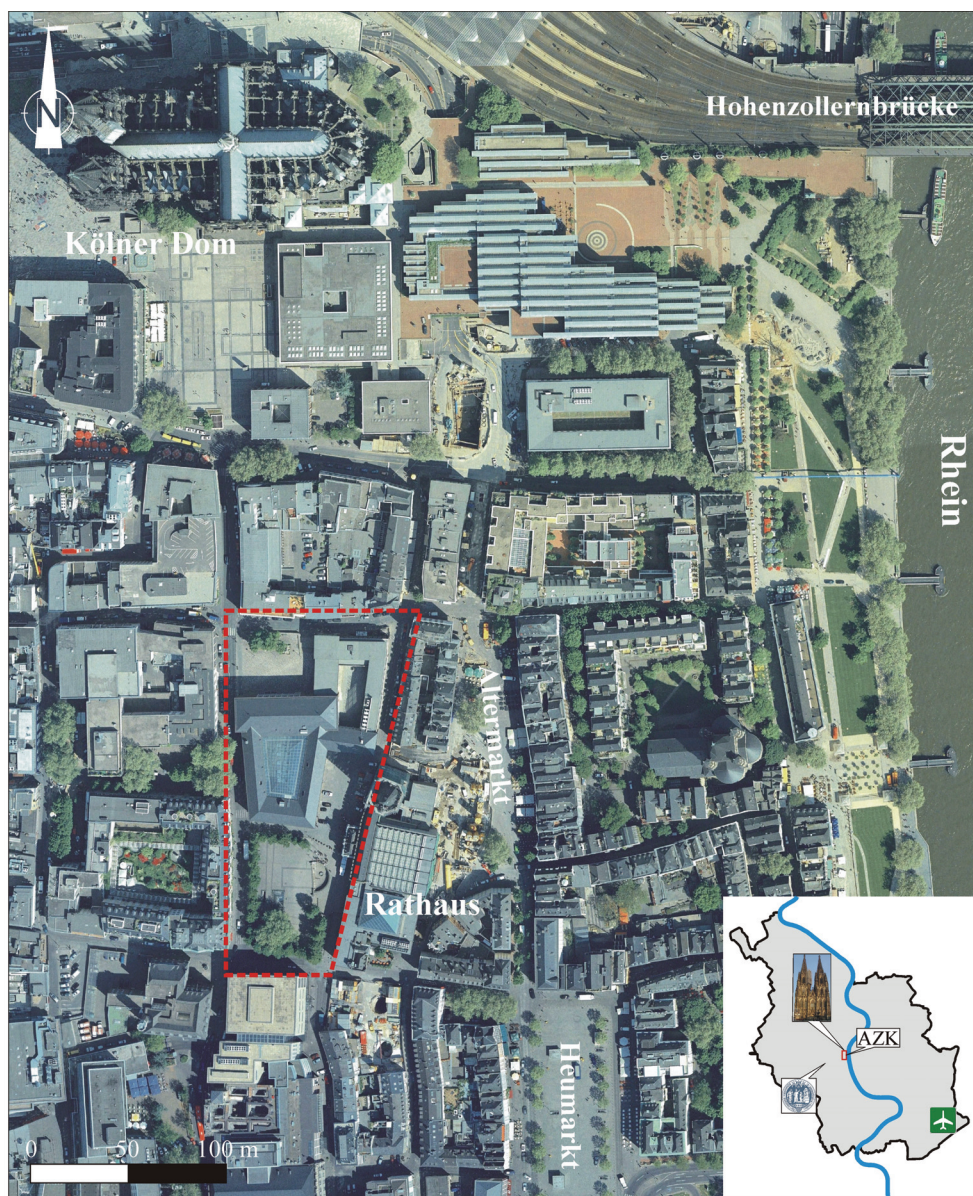


Abbildung 3.2: Luftbild des Altstadtbereiches von Köln mit den Grenzen des Arbeitsgebietes (rot). Zur Orientierung sind markante Gebäude und Plätze im Stadtbild markiert. Die Karte in der rechten, unteren Ecke zeigt die Lage der Altstadt (rot) innerhalb der Stadtgrenzen von Köln. Zur Orientierung sind der Dom, die Universität und der Flughafen eingezeichnet (Luftbild: Google Maps, 2010).

Die Grabungen der Archäologischen Zone Köln finden auf dem Plateau einer pleistozänen Flussterrasse statt. Eine detaillierte Beschreibung des Grabungsareals und des geplanten Museumsbereiches kann Kapitel 5.1 entnommen werden. Das Arbeitsgebiet umfasst das administrative Viertel der Stadt Köln, das sich seit der römischen Besiedlung im Areal um das heutige Rathaus befunden hat. Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht über die Koordinaten und Höhenlagen von signifikanten Punkten (Abb. 3.3) im Arbeitsgebiet.

Tabelle 3.1: Gauß-Krüger Koordinaten und Höhenlagen von signifikanten Punkten im Arbeitsgebiet.

| Nr. | Beschreibung | Rechtswert | Hochwert | Höhe (m ü.NN) |
|-----|-------------------------|------------|------------|---------------|
| 1 | Abwasserkanal (Eingang) | 2567411.07 | 5645317.11 | 44.71 |
| 2 | Praetorium Octogon | 2567444.38 | 5645245.49 | 45.39 |
| 3 | Nördl. Rathausplatz | 2567448.00 | 5645231.00 | 52.15 |
| 4 | Rathaus (Eingang Laube) | 2567449.00 | 5645209.00 | 52.10 |
| 5 | Kloake (Boden) | 2567420.76 | 5645186.96 | 42.97 |
| 6 | Apsis mit Brunnen | 2567437.73 | 5645184.21 | 49.21 |
| 7 | Mikwe (Tauchbecken) | 2567416.17 | 5645172.23 | 36.66 |

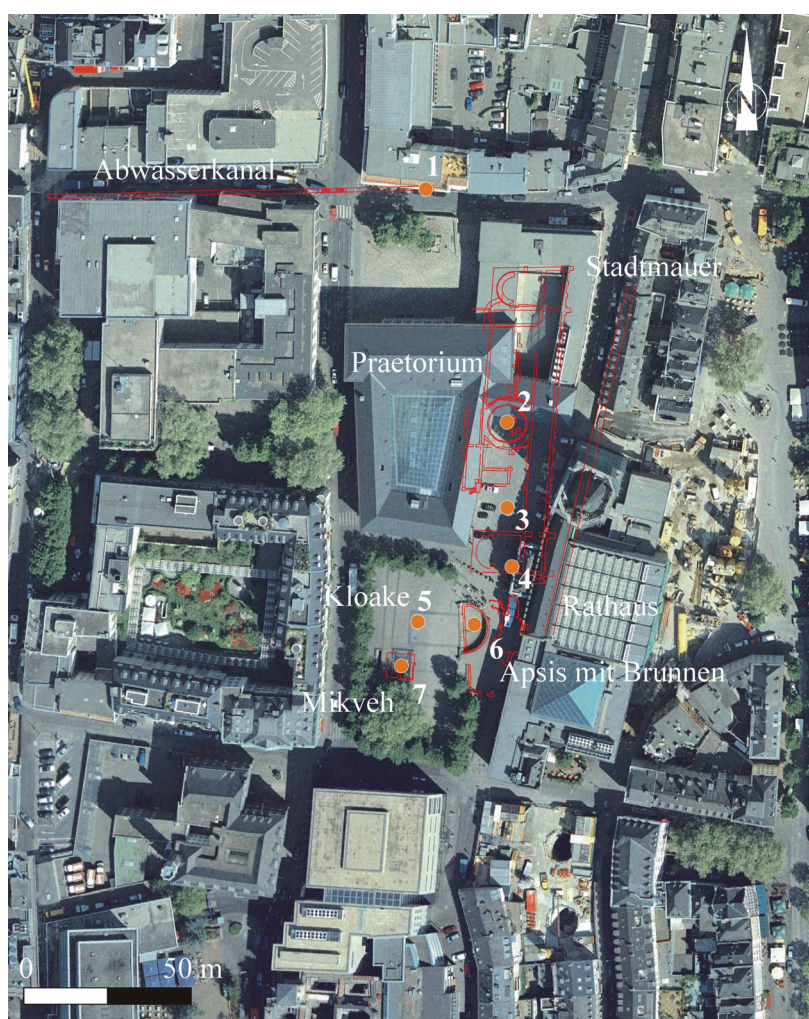


Abbildung 3.3: Lage der in Tabelle 3.1 aufgeführten signifikanten Punkte im Arbeitsgebiet. Zur Orientierung sind die Grundrisse der wichtigsten archäologischen Befunde in rot eingezeichnet (Luftbild: Google Maps, 2010).

GEOLOGISCHER ÜBERBLICK

Die Geologie der Niederrheinischen Bucht ist durch die tektonische Aktivität und die begleitende Sedimentation seit dem Eozän geprägt. Der Untergrund sowie die angrenzenden Höhenzüge werden überwiegend von Sedimenten des Devons und des Karbons aufgebaut. Im Südwesten finden sich Relikte der Ablagerungen aus dem Silur und dem Kambrium. Erst ab dem Unterdevon lässt sich für die Niederrheinische Bucht eine kontinuierliche Sedimentationabfolge rekonstruieren (Walter, 1992) (Abb. 3.4).

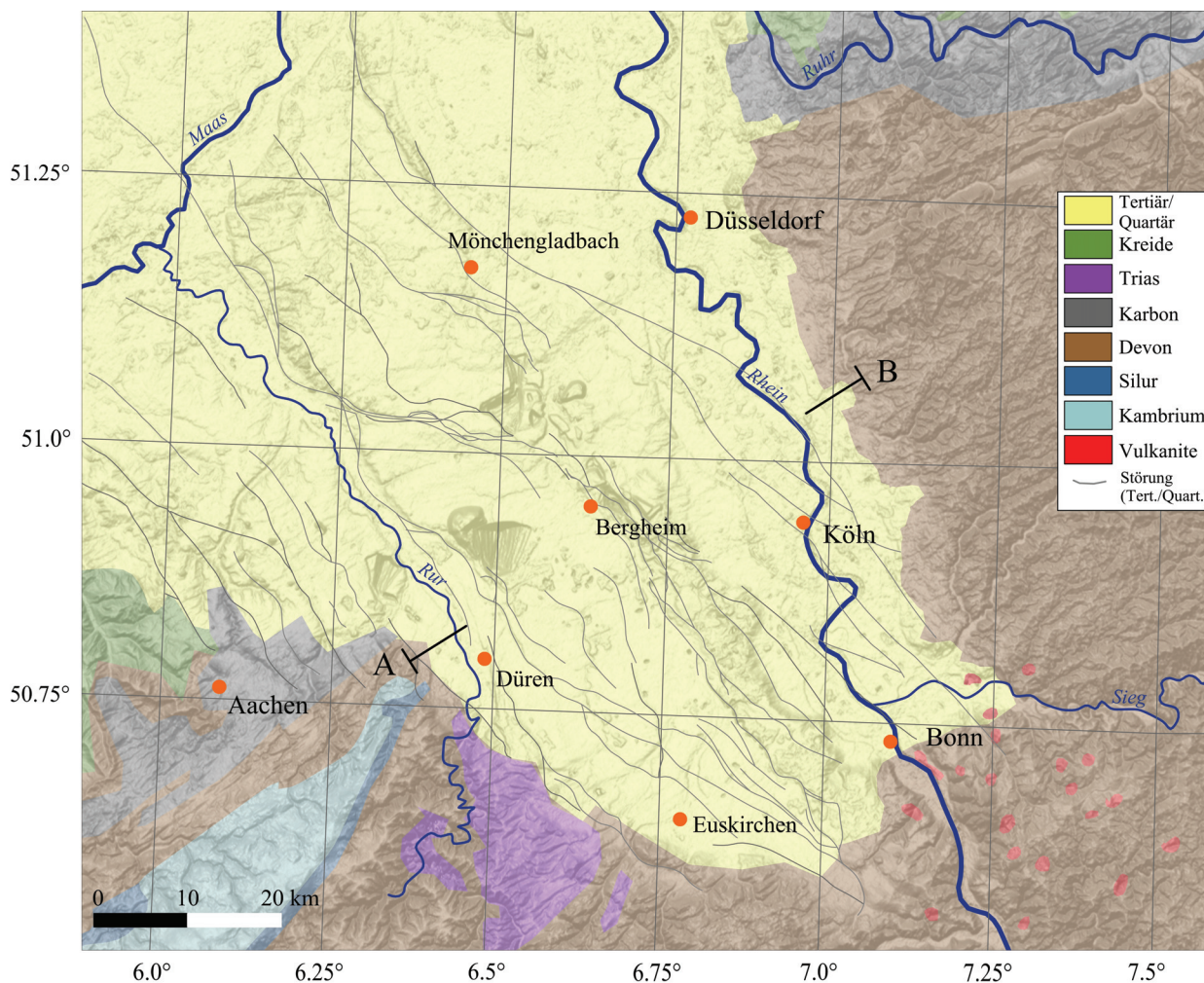


Abbildung 3.4: Geologische Übersichtskarte der Niederrheinischen Bucht. Die Markierungen A und B zeigen den Start- und Endpunkt des Profils in Abbildung 3.5 (nach Hinzen und Reamer, 2007).

Im Unterdevon wurde durch Riftingprozesse der Bereich des südlichen Kontinentalrandes des Old-Red-Kontinentes überprägt und es entstand mit dem Rheinischen Trog ein Senkungsgebiet in Form eines frühen Grabenstadiums (Oncken, 1999). Diese Senke wurde von Norden mit Sedimenten des Old-Red-Kontinentes gefüllt. Abhängig von der Entfernung zum Kontinent gab es marin, brackisch, limnisch und terrestrisch geprägte Bereiche. Es wurden vor allem graue Tonsteine, Schluffsteine, Sandsteine sowie teilweise Quarzite abgelagert. Im Mitteldevon senkt sich der Sedimentationsraum ab, wodurch es zur Bildung vollmariner Massenkalksteine kommt. In den Randbereichen werden Sand und Tonsteine abgelagert (Alberts et al., 1988). Im Süden war das Gebiet durch die Mitteldeutsche Kristallinschwelle begrenzt, die im Oberdevon als Liefergebiet für Flyschsedimente diente (Krumsiek, 1997). Hier dominieren Wechselfolgen von Sand-, Ton- und Schluffsteinen.

Im Unterkarbon bildete sich durch einsetzende Subduktion ein Tiefseetrog an dessen Südrand zunächst Sedimente der Kulmfazies (Tonsteine, Alaunschiefer, Kieselschiefer), später Grauwacken abgelagert wurden (Walter, 1992). Im Nord-Osten der heutigen Niederrheinischen Bucht bildete sich im Küstengebiet des Old-Red-Kontinentes die Kohlenkalkfazies (Walter, 1992; Krumsiek, 1997). Die variszische Orogenese deformierte in dieser Zeit, von Süden voranschreitend, das Gebiet massiv, so dass es zu einer Verkürzung in N-S-Richtung kam, die zur Überschiebung und Steilstellung von Schuppen führte. Die Überschiebungstektonik dominiert hierbei im südwestlichen Bereich, während im Norden Faltentektonik vorherrscht (Walter, 1992). Im Oberkarbon kam es zu einem Stillstand der Subduktion und das zuvor entstandene Gebiet der Subvariszischen Saumsenke im Norden der heutigen Niederrheinischen Bucht wurde mit der Molasse des entstandenen variszischen Gebirges gefüllt (Walter, 1992). Auf den deltaischen Ablagerungen der Flüsse bildeten sich wiederholt Moore, die durch erneute Transgressionen überdeckt wurden (Alberts et al., 1988).

Im Unterperm dient der Großteil der heutigen Niederrheinischen Bucht als Liefergebiet für die Mitteleuropäische Senke, in der zunächst Konglomerate, dann sandig-toniger Verwitterungsschutt abgelagert wird (Grabert, 1998). Im oberen Perm (Zechstein) war das variszische Gebirge schon bis auf den Rumpf abgetragen und es bildete sich im nördlichen Niederrheingebiet eine Meeresbucht, die durch eine Schwelle vom Norddeutschen Zechsteinbecken getrennt war (Walter, 1992).

Während der Trias herrschten im Buntsandstein terrestrischer Sedimentationsbedingungen, wobei es im nördlichen Bereich im Oberen Buntsandstein zur Ablagerung von Salzen kam. Zu Beginn des Muschelkalkes war die Niederrheinische Bucht komplett überflutet und es kam zur Ablagerung charakteristischer Wellenkalk (Walter, 1992). Ablagerungen des Mittleren und Oberen Muschelkalkes sind nur eingeschränkt zu finden. Im Mittleren Muschelkalk dominieren salinare Sedimente, im Oberen Muschelkalk findet man im nördlichen Bereich marine Kalk- und Dolomitgesteine und im Süden sandig-mergelige Dolomite (Grabert, 1998). Aus dem Keuper sind nur Ton- und Sandsteine aus einer Transgression im Rät nachgewiesen (Walter, 1992).

Diese transgressive Phase umfasste auch das Untere und Teile des Mittleren Juras und führte zur Ablagerung von Ton-, Mergel- und Kalksteinen. Neben Tonen und Mergeln wurden im nördlichen Bereich oolithische Eisenerze abgelagert. Ab dem Mittleren Jura herrschten in der Niederrheinischen Bucht kontinentale Bedingungen was zur Erosion des Großteils der unterjurassischen Gesteine führte, die nur noch am Nordrand der Eifel erhalten geblieben sind.

Sedimente der Kreide sind nur im nördlichen Bereich, im Aachener Raum und in der Münsterländer Bucht nachzuweisen. Abb. 3.5 zeigt ein SW-NE verlaufendes Profil durch die Niederrheinische Bucht, das die Lage des Grundgebirges im Verhältnis zur Sedimentfüllung des Beckens zeigt.

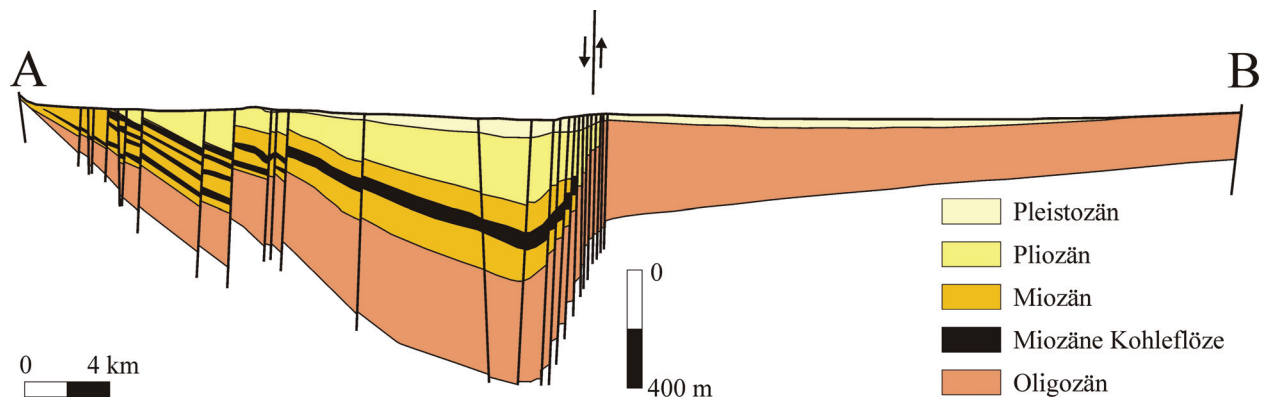


Abbildung 3.5: Profilschnitt durch die Niederrheinische Bucht von SW nach NE. Der Start- und der Endpunkt des Profils sind in Abb. 3.4 markiert (nach Schäfer, 2005).

Im Tertiär kam es durch die beginnende Öffnung des Nordatlantiks zu einer Änderung der Hauptkompressionsrichtung im Spannungsfeld. Die zuvor NNE-SSW ausgerichtete Kompression rotierte während des Tertiärs gegen den Uhrzeigersinn auf NW-SE (Ahorner, 1975; Dewey et al., 1973). Mit der Änderung des Spannungsfeldes setzte zunächst im Norden die Öffnung des Niederrheingrabens und im Süden die Öffnung des Oberrheingrabens ein. In der Niederrheinischen Bucht begann die bis heute andauernde Ablagerung der Sedimentfüllung. Mit dem Beginn des Tertiärs wurden die randlichen Bereiche der Niederrheinischen Bucht überflutet und es kam sowohl zur Ablagerung mariner Kalke und Mergel als auch zur Sedimentation von Sanden und Tonen. Im Eozän ist das Gebiet vorwiegend terrestrisch geprägt, wobei es vereinzelt zur Sedimentation limnisch-fluviatiler Sande und Tone mit geringmächtigen Braunkohlen kommt. Im mittleren Tertiär hatte sich die Kompressionsrichtung bereits auf nahezu N-S gedreht und führte zur Bildung des Beckens der Niederrheinischen Bucht. Im Oligozän senkte sich das Gebiet, nach der Ablagerung von fluviatilen Konglomeraten weiter ab und es kam zu einer Transgression aus Nord-Westen, die während ihres Höchststandes bis in den Bonner Raum reichte (Klostermann, 1992; Walter, 1992). Zu dieser Zeit lagerten sich neben mächtigen Meeressanden erste Braunkohlesande ab.

Vor ca. 28 Millionen Jahren setzte in der südöstlichen Niederrheinischen Bucht der Siebengebirgsvulkanismus ein, dessen Trachyttuffe in diesem Bereich auf den randmarinen Sanden und Tonen des Oligozäns lagern (Grünhagen, 1981). Im Miozän setzte die allmähliche Regression der Nordsee ein und ein limnisch-fluviatiles Sedimentationsmilieu setzte ein. In den Übergangsbereichen lagerten sich mächtige Torfschichten ab, die heute die Hauptflözgruppe bilden (Walter, 1992). Ende des Miozäns führte eine verstärkte Hebung des Schiefergebirges zu weiteren Senkungen in der Bucht, wodurch die nördlichen Randgebiete erneut unter marinen Einfluss gelangten. Im zentralen Bereich etablierte sich ein limnisch geprägter Sedimentationsraum. Im späten Tertiär war die Rotation der Hauptkompressionsrichtung abgeschlossen (Ahorner, 1975) und das Sedimentationsmilieu wurde zunehmend fluviatil. Die entstandenen tektonischen Einheiten der Niederrheinischen Bucht werden in Kapitel 6.2.1 vorgestellt. Es bildete sich ein System aus den Hauptflüssen Rhein, Mosel, Maas und Sieg (Boenigk, 1978) welche die so genannte Hauptkies-Serie ablagerten, welche die Grenze zum Pliozän markiert. Im Pliozän bildete sich ein limnisch-fluviatiler Ablagerungsraum, dessen tonige, zum Teil sandig-kiesige Sedimente zusammen mit dem Hauptkies die niederrheinischen Kieseloolith Schichten bildeten. Darüber bilden die fluviatil-limnischen Reuvertone den Abschluss des Tertiärs (Schäfer et al., 2005).

Im Quartär bildete sich ein verzweigtes Flusssystem aus Maas und Rhein. Dieses Flusssystem lagerte die für die Niederrheinische Bucht prägende, komplexe quartäre Terrassenarchitektur ab (Boenigk, 1978). Die ersten Terrassenablagerungen werden nach Boenigk und Frechen (2006) in der Tegelen Formation zusammengefasst. Hier handelt es sich um Kiese und Sande, die von Wechselfolgen von Kiesen und Tonen überlagert werden. Schwermineralanalysen (Kemna, 2005) haben gezeigt, das zumindest teilweise Material aus den Alpen angeliefert wurde. Es folgt mit den Grobkiesen und Sanden der Holzweiler-Formation ein Wechsel im Liefergebiet zur Maas (Boenigk, 2002). Im späten Unter Pleistozän setzt die Sedimentation des Hauptterrassenkomplexes ein. Dieser wird nach Boenigk und Frechen (2006) in die Ältere Hauptterrasse (UT1), die Jüngere Hauptterrasse (UT2/3) sowie die Unterstufe der Jüngeren Hauptterrasse (UT 4) gegliedert. Die Grobsande und Kiese zeigen aufgearbeitetes tertiäres Material sowie im weiteren Verlauf aufgearbeitete Sedimente der Älteren Hauptterrasse (Boenigk und Frechen, 2006). Durch Hebung des Rheinischen Schiefergebirges wurde im Mittleren Pleistozän das Rheintal nach Osten verlagert und verengt, was zu einem tiefen Einschnitten in ältere Sedimente führte (Boenigk und Frechen, 2006; Kemna, 2008). In diesem Tal wurde der Mittelterrassenkomplex abgelagert, der jedoch nur an wenigen Stellen erhalten geblieben ist. Häufig kann die Lage nur über Einschnittstufen im Untergrund bestimmt werden (Boenigk und Frechen, 2006). Der Komplex wird in die Obere Mittelterrasse (UMT), die Mittlere Mittelterrasse (MMT) und die Untere Mittelterrasse (LMT) unterteilt. Die jüngsten Ablagerungen werden vom Niederterrassenkomplex gebildet, der den direkten Untergrund des Arbeitsgebietes aufbaut. Diese Einheit wird im Kapitel 6.1.2 im Detail besprochen. Die Sedimentmächtigkeit der tertiären und quartären Ablagerungen nimmt im Zentrum der Niederrheinischen Bucht zu. Während im Bereich von Köln nur Mächtigkeiten von bis zu 200 m auftreten sind im zentralen Bereich Mächtigkeiten bis zu 1200 m zu finden (Weber, 2007).

SEISMIZITÄT

Die Niederrheinische Bucht zählt zusammen mit dem Oberrheingraben im Südwesten Deutschlands, dem Vogtland im zentral östlichen Bereich und der Schwäbischen Alb im Süden zu den seismisch aktivsten Gebieten West- und Mitteleuropas (Ahorne et al., 1970; Reamer und Hinzen, 2004; Hinzen und Reamer, 2007). Die Niederrheinische Bucht zeigt hierbei leichte bis moderate Seismizität, was bei der vorliegenden Intraplattensituation zu erwarten ist (Hinzen und Reamer, 2007). Das stärkste instrumentell aufgezeichnete Erdbeben in der Region ereignete sich am 13.4.1992 mit einer Lokalmagnitude von 5.9 bei Roermond, nahe der deutsch-niederländischen Grenze (u.a. Ahorne, 1993; 1994; Hinzen und Reamer, 2007). Insgesamt entstand ein versicherter Sachschaden von ca. 150 Mill. € in Deutschland und den Niederlanden. Das letzte Schadensbeben der Region ereignete sich am 22.7.2002 bei Alsdorf mit einer Lokalmagnitude von 4.9 (Hinzen, 2005a). Über den Zeitraum der instrumentellen Aufzeichnungen hinaus lassen sich aus den historischen Quellen knapp 20 Beben mit Epizentralintensitäten \geq VII (Medwedew-Sponheuer-Karnik Skala, MSK) belegen (Meidow, 1995). Eine MSK-Intensität von VII wird als schadensverursachend eingeordnet. Auf Grundlage der instrumentellen Aufzeichnungen und des historischen Kataloges seit 1600 wurde von Hinzen und Reamer (2007) das Gutenberg-Richter-Modell für die Region abgeleitet (Abb. 3.6)

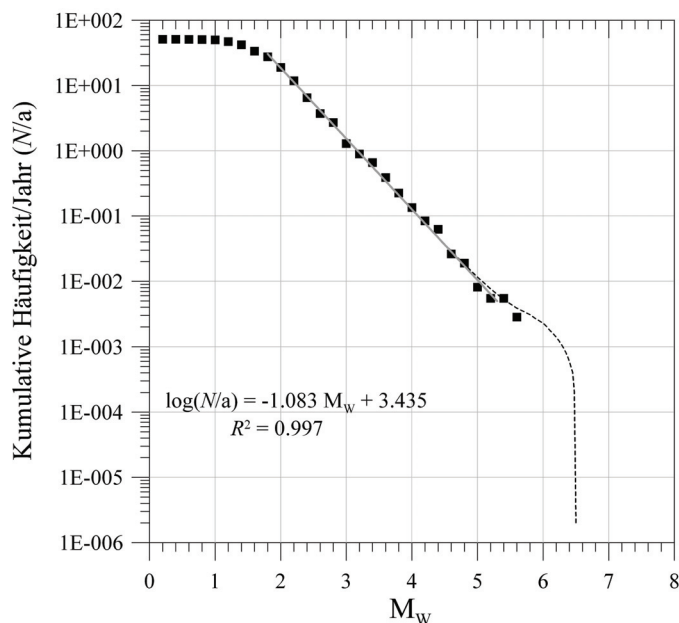


Abbildung 3.6: Kumulative Häufigkeit von Erdbeben im Gebiet der nördlichen Rheinlande basierend auf einem Vollständigkeitsmodell und unter der Annahme eines kontinuierlichen Aufzeichnungszeitraumes. In grau ist die Gutenberg-Richter Linie für Magnituden $1.8 \leq M_w \leq 5.2$ eingezeichnet (Korrelationskoeffizient $R^2=0.997$). Die gestrichelte Linie zeigt ein charakteristisches Erdbebenmodell nach Youngs und Coppersmith (1985) mit einer Wiederkehrperiode von 5000 Jahren für Erdbeben mit der Momentmagnitude 6.5 (nach Hinzen und Reamer, 2007)

Nach Hinzen und Reamer (2007) besitzt ein Beben mit der Momentmagnitude 5.0 eine Wiederkehrperiode von ca. 100 Jahren. Das stärkste anzunehmende Ereignis für die Region kann nach Hinzen und Reamer (2007) eine Magnitude von 7.0 erreichen. Abbildung 3.7 zeigt eine Karte der Seismizität der Niederrheinischen Bucht seit 1600.

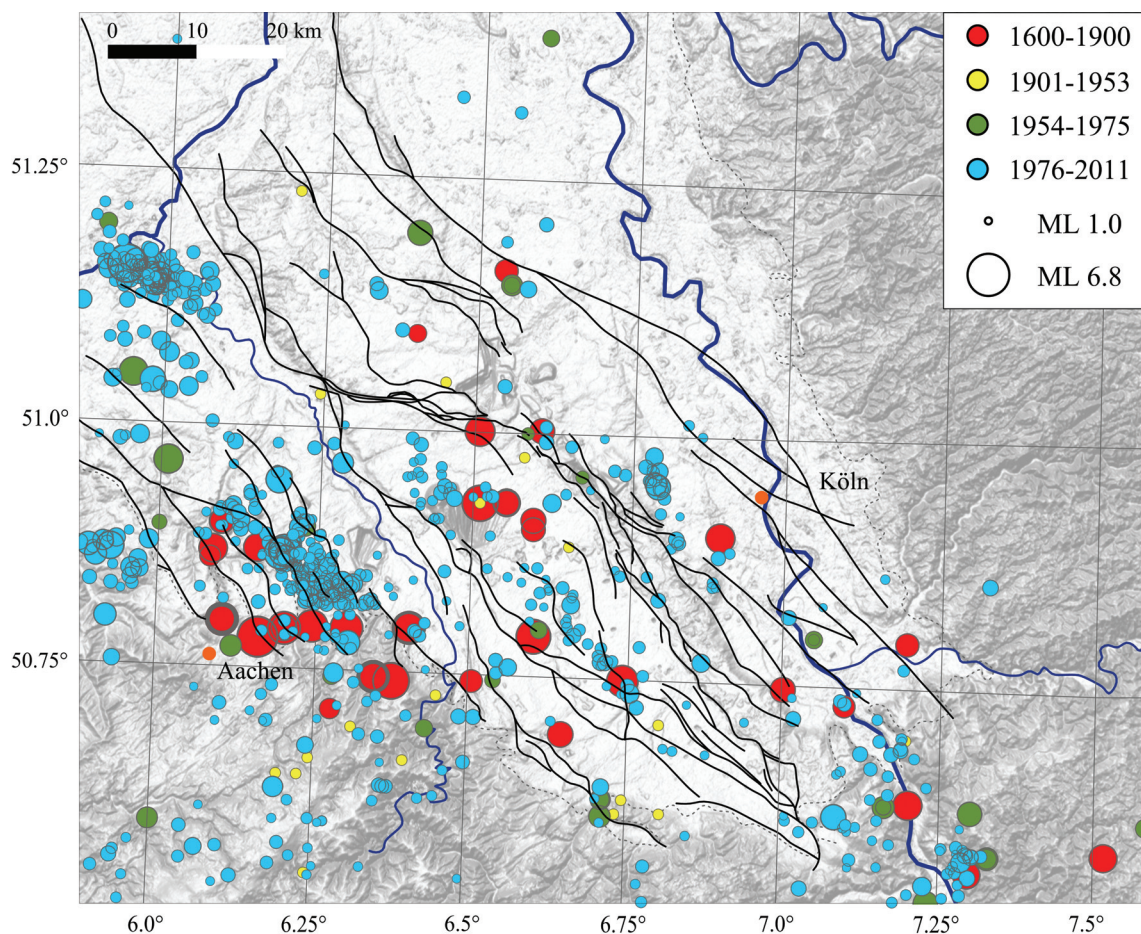


Abbildung 3.7: Seismizität der Niederrheinischen Bucht von 1600-2011 (nach Hinzen und Reamer, 2007; erweitert mit Daten der Erdbebenstation Bensberg).

Die Analyse des instrumentellen Kataloges zeigt, dass die seismische Aktivität in der Niederrheinischen Bucht und den nördlichen Rheinlande hauptsächlich in Tiefenlagen bis 15 km stattfindet (Reamer und Hinzen, 2004). Abbildung 3.8 zeigt die Verteilung der Erdbeben bis in eine Tiefe von 30 km.

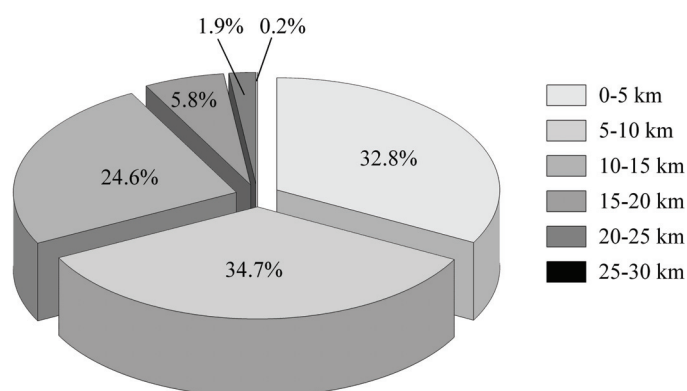


Abbildung 3.8: Tiefenverteilung von 1336 Erdbeben zwischen 1975 und 2001 in den nördlichen Rheinlanden (nach Reamer und Hinzen, 2004).

Neben den instrumentellen Aufzeichnungen und den historischen Quellen belegen paläoseismologische Untersuchungen mehrere Erdbeben mit Momentmagnituden >6.3 seit dem Holozän (Camelbeeck und Meghraoui, 1998; Vanneste und Verbeeck, 2001; Vanneste et al., 2001; 2008). Die vorliegende Situation in der Niederrheinischen Bucht zeigt, dass bei einer Untersuchung von Gebäudeschäden in dieser Region Erdbeben als mögliche Schadensursache mit einbezogen werden müssen.

4. Laserscanning

Als Laserscanning wird die automatisierte, berührungs- und reflektorlose Erfassung von dreidimensionalen Koordinaten eines Objektes, eines Gebäudes oder des Geländes, mit Hilfe von Laserlicht bezeichnet (Bryan, 2004). Anders als bei gerichteten Vermessungsverfahren, wie elektronischer Distanzmessung (EDM) oder reflektorloser elektronischer Distanzmessung (REDM), bei denen vor der Messung diskrete Punkte ausgewählt werden, wird beim Laserscanning eine dreidimensionale Punktwolke des Messbereiches erzeugt (Bryan, 2004; Lerma, 2009). Die Auswahl der diskreten Messpunkte erfolgt also „quasi-zufällig (Kern, 2003). Die auf diese Weise erzeugte Punktwolke dient der Erstellung von Modellen der bearbeiteten Struktur. Diese Modelle, die mit Hilfe von traditionellen Vermessungspunkten georeferenziert werden können, ermöglichen die dreidimensionale, millimetergenaue Vermessung sowie die Quantifizierung von Neigungen und Abständen (Lerma et al., 2008).

Grundlage für die Entwicklung der heutigen Geräte war die Erfindung des Lasers sowie der laserbasierten Distanzmessung in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts (Large und Heritage, 2009). Heute werden Laserscanner u.a. in der Vermessung, der Qualitätskontrolle in der industriellen Fertigung, der Medizin, Archäologie sowie für verschiedene naturwissenschaftliche Fragestellungen eingesetzt. In der hier vorgestellten Studie wurde ein 3D-Laserscanner verwendet, um das archäologische Inventar des Arbeitsgebietes zu kartieren und auf Grundlage der Daten eine detaillierte Schadensauswertung durchzuführen.

4.1 Lasertechnik

Die Grundlage für die Konstruktion von Lasermesssystemen wurde 1960 durch die Entwicklung des ersten Feststoff Rubin Lasers („*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*“) durch Theodore Maiman geschaffen (Maiman, 1960). Nachdem in den 1960er Jahren zunächst Grundlagenforschung betrieben wurde, entwickelte sich die Technik in den 1970er Jahren bis zur kommerziellen Marktreife (Price und Uren, 1989). Nach der Entwicklung des ersten Laser-Distanzmessgerätes Mitte der 1960er Jahre wurden Laser in immer neuen Anwendungsbereichen verwendet. Durch die Entwicklung von leichteren, portablen und witterungsbeständigen Geräten in den 1980er und 1990er Jahren ist die Lasermesstechnik im Bereich der Vermessung heute ein Standardwerkzeug (Large und Heritage, 2009). Auch andere Anwendungsfelder wurden im Bereich der Naturwissenschaften sowie im Umgang mit Kultur- und Naturerbe erschlossen (siehe Kapitel 4.6).

FUNKTIONSWEISE EINES LASERS

Ein Laser ist im Grundprinzip aus drei Bauteilen aufgebaut: Einer Energiequelle, einem optischen Verstärker mit einem aktiven Medium sowie einem Resonator (Petrie und Toth, 2009). Im Verstärker wird die Amplitude einer Lichtwelle mit Hilfe eines aktiven Mediums verstärkt. Im aktiven Medium wird dabei das Prinzip der induzierten Emission genutzt (Petrie und Toth, 2009). Wird dem aktiven Medium Energie zugeführt, werden dort Atome in ein höheres Energieniveau gehoben. Fallen diese Atome nun wieder auf ein niedrigeres Energieniveau zurück, wird ein Photon emittiert. Die Energie des Photons ist:

$$E_{\gamma} = hf \quad (4.1)$$

Hierbei ist f die Frequenz der Strahlung und h das Plancksche Wirkungsquantum (Vogel, 1974). Da der Zeitpunkt des Übergangs sowie die Richtung des emittierten Photons nicht vorhergesagt werden können, wird dieser Vorgang als spontane Emission bezeichnet. Durch das Anlegen einer externen Strahlung z.B. Licht können, durch den photoelektrischen Effekt Übergänge der Atome, gezielt ausgelöst werden, wobei das entstehende Photon in Richtung der auftreffenden Strahlung emittiert wird (Vogel, 1974). Die entstehende Lichtwelle polarisiert die angeregten Atome und durch die Überlagerung der verschiedenen Wellen, wird die einfallende Welle phasenrichtig verstärkt (Kern, 2003).

Der Resonator bildet eine Rückkopplungsschleife um den Verstärker, bei der ein Teil dieses verstärkten Lichtes erneut zum Verstärker umleitet wird (Abb. 4.1).

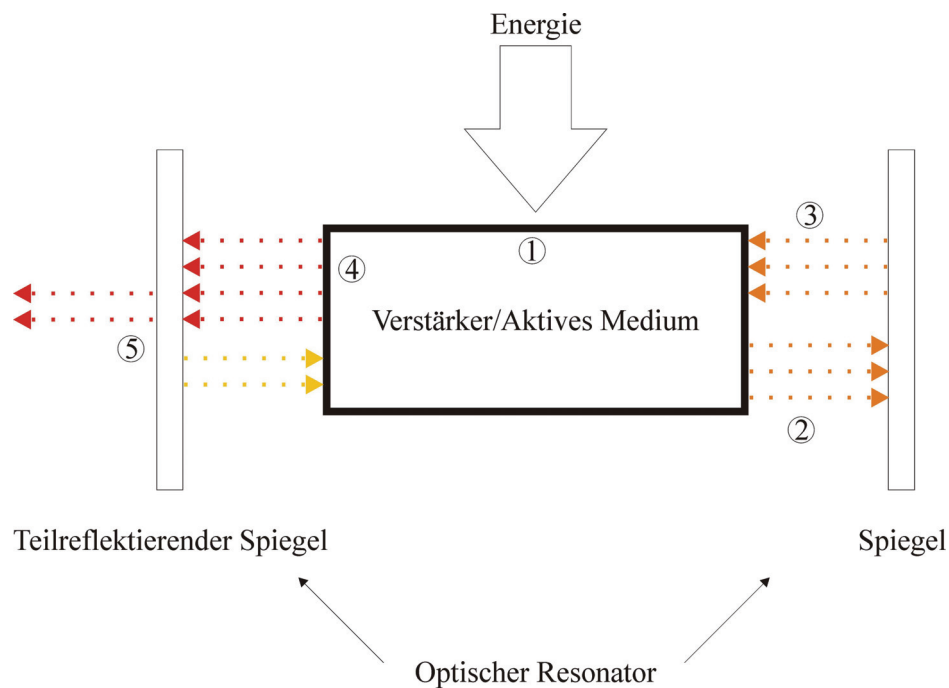


Abbildung 4.1: Grundprinzip eines Lasers. Das aktive Medium wird durch zugeführte Energie angeregt (1) und das Medium emittiert Photonen (2). Die Strahlung wird über einen Spiegel zum aktiven Medium/Verstärker reflektiert. Durch die Reflexion bestimmter Wellenlängen und die Verstärkung im aktiven Medium wird monochromes Laserlicht erzeugt (4) das teilweise über einen semipermeablen Spiegel austritt (5). (verändert nach Kern, 2003 und Petrie und Toth, 2009).

Ist der Resonator auf die Wellenlänge des genutzten Lichtes abgestimmt entsteht durch diese Rückkopplung ein Laseroszillator. Die Abstimmung des Resonators erfolgt über den Einsatz von semitransparenten Spiegeln, die nur eine bestimmte Wellenlänge reflektieren und zum Verstärker weiterleiten.

Bei diesem Aufbau ist es wichtig, dass im aktiven Medium mehr Atome in einem höheren Energiezustand vorliegen, als in einem niedrigeren, damit mehr Strahlung emittiert wird als einfallende Photonen absorbiert werden. Um diesen Zustand der so genannten Besetzungsinversion zu erhalten, muss dem System permanent Energie zugeführt werden (Kern, 2003). In modernen Lasern kann diese Energiezufuhr durch optische sowie elektrische Quellen erfolgen (Petrie und Toth, 2009). Durch exakte Abstimmung des Verstärkers und des Resonators wird eine stehende Welle, monochromen Lichtes erzeugt, die teilweise am Ausgang des Verstärkers austritt (Kern, 2003). Eine detaillierte Erklärung der Verstärkung

und der Aufspaltung des Lichtes im Resonator kann der Dissertation von F. Kern (2003) entnommen werden.

Laser werden anhand der verschiedenen aktiven Medien unterschieden. Es gibt Feststofflaser bei denen z.B. Rubin oder Neodym als aktives Medium eingesetzt wird, Gaslaser (z.B. HeNe-Laser, CO₂-Laser), Halbleiterlaser (z.B. GaAs-Laser) sowie Farbstofflaser bei denen Farbstoffe (z.B. Kumarin, Rhodamin) in einer meist alkoholischen Lösung als aktives Medium verwendet werden (Kern, 2003; Petrie und Toth, 2009).

EIGENSCHAFTEN DES LASERLICHTES

Durch die verschiedenen aktiven Medien sowie unterschiedliche Konfigurationen des Resonators gibt es Laser mit Wellenlängen im schwachen, ultravioletten Bereich (300 nm) bis zum mittleren Infrarotbereich (10.000 nm) (Kern, 2003). Der in dieser Arbeit verwendete Halbleiterlaser des FARO Photon 80 liegt mit 785 nm im nahen Infrarotbereich. Im Vergleich dazu erstreckt sich der für den Menschen sichtbare Bereich des Lichtes im Wellenlängenbereich von 380 – 780 nm (Abb. 4.2).

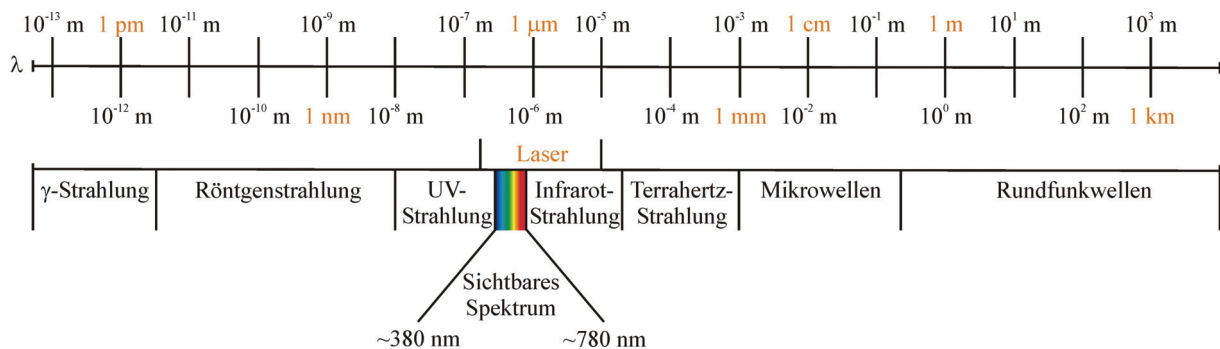


Abbildung 4.2: Das elektromagnetische Spektrum. Die obere Skala zeigt die Wellenlänge λ der Strahlung. Der untere Bereich zeigt die Anwendung bzw. die Bezeichnung der Strahlung der jeweiligen Wellenlänge.

Im Gegensatz zu natürlichem Licht, welches immer inkohärent ist und ein Spektrum verschiedener Frequenzen umfasst, ist Laserlicht kohärent. Als kohärente Wellen werden zwei Wellen bezeichnet bei denen die Zeitabhängigkeit der Amplituden identisch ist. Für harmonische Wellen bedeutet dies, dass beide Wellen die gleiche Frequenz haben müssen (Vogel, 1974). Laserstrahlen gleicher Frequenz würden im Gegensatz zu inkohärenten Lichtquellen d.h. Lichtquellen, die keinen Frequenzbezug zueinander haben, bei Überlagerung keine Addition der Feldstärken zeigen, sondern Interferenzmuster (Vogel, 1974; Kern 2003). Durch die definierte Frequenz und Richtung der Wellen ist Laserlicht, im Gegensatz zum Licht anderen Lichtquellen, monochrom, da es eine sehr enge spektrale Bandbreite besitzt (Kern, 2003).

STRAHLDIVERGENZ EINES LASERSTRAHLS

Ein Laser erzeugt ein nahezu paralleles Strahlenbündel, das jedoch aufgrund der Konstruktionsweise eine Divergenz aufweist. Grund für diese Divergenz ist die Beugung des Lichtes beim Austritt aus der Apertur des Gerätes. Mit zunehmender Distanz von der Austrittsöffnung wird der Radius des ausgesendeten Strahls größer. Nach Lerma et al. (2008) lässt sich der Radius eines Laserstrahls in einer bestimmten Entfernung berechnen:

$$r_s = r_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \cdot s}{\pi \cdot r_0^2} \right)^2} \quad (4.2)$$

Hierbei ist r_s der Radius des Laserstrahls in der Entfernung s , r_0 der Radius des Laserstrahls direkt an der Apertur und λ die Wellenlänge des Laserlichtes. Daraus folgt, dass der Radius des Laserstrahles neben der Distanz vom Ausgangspunkt, von der Wellenlänge des Laserlichtes abhängt. Kürzere Wellenlängen zeigen hierbei geringere Beugungseffekte d.h. eine geringere Divergenz. Der maximale Divergenzwinkel α in rad, lässt sich nach Brenner (2006) bestimmen:

$$\alpha \geq 2.44 \frac{\lambda}{2r_0} \quad (4.3)$$

Der Radius des Strahls am Zielobjekt r_s ist damit:

$$r_s = r_0 + \sin \frac{\alpha}{2} \cdot s \quad (4.4)$$

Je größer die Strahldivergenz, desto wahrscheinlicher ist es, dass der Strahl bei einer unregelmäßigen Objektoberfläche keinen einzelnen diskreten Punkt auf dem Objekt trifft, sondern einen Bereich mit unterschiedlichen Entfernungen zum Messgerät (Abb. 4.3).

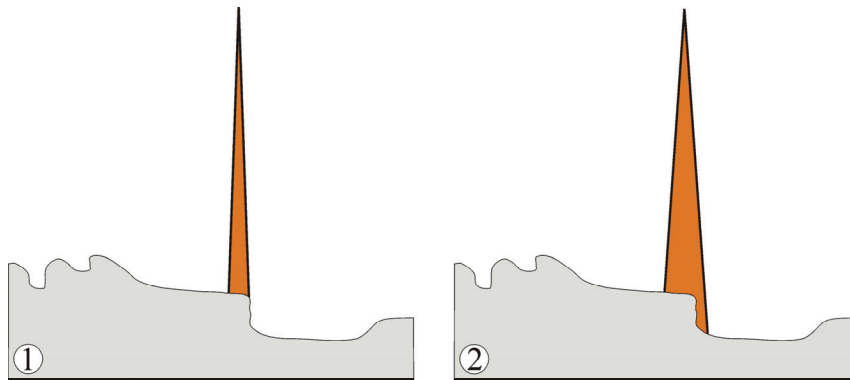


Abbildung 4.3: Einfluss von geringer (1) und hoher (2) Strahldivergenz auf die Entfernungsmessung beim Auftreffen auf die Zieloberfläche (verändert nach Heritage und Large, 2009).

Gleiches gilt für hintereinander liegende Objekte. Je größer die Strahldivergenz, desto größer der Radius des Strahls und desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Strahl zum Teil ein näher zum Messgerät liegendes Objekt trifft und zum Teil ein weiter entfernt liegendes Objekt. In beiden Fällen liefert die Entfernungsmessung einen Mittelwert der Reflexionsabstände. Je kleiner also die Strahldivergenz ist, desto kleiner ist auch die Messungenauigkeit (Heritage und Large, 2009).

4.2 Beeinflussende Faktoren der Laserdistanzmessung

Nutzt man einen Laserstrahl zur Entfernungsmessung, müssen zunächst die Vorgänge beim Auftreffen des Laserstrahls auf ein Objekt berücksichtigt werden, da zur Streckenmessung neben dem ausgesendeten Signal, das empfangene Signal nötig ist.

REFLEKTIVITÄT

Trifft eine Strahlung auf einen Objekt, so wird ein Teil der einfallenden Strahlungsenergie (E_{Ein}) reflektiert (E_{Ref}), ein Teil absorbiert (E_{Abs}) und ein Teil transmittiert (E_{Tra}) (Heritage und Large, 2009).

$$E_{\text{Ein}} = E_{\text{Ref}} + E_{\text{Abs}} + E_{\text{Tra}} \quad (4.5)$$

Für die Entfernungsmessung mit einem Lasermesssystem ist der reflektierte Anteil der einfallenden Strahlung entscheidend. Über das Verhältnis zwischen der Leistung der reflektierten Strahlung Φ_{Ref} und der Leistung der einfallenden Strahlung Φ_{Ein} wird der Reflexionsgrad (Vogel, 1974) bzw. die so genannte Reflektivität eines Körpers beschrieben:

$$\rho = \frac{\Phi_{\text{Ref}}}{\Phi_{\text{Ein}}} \quad (4.6)$$

Wie viel Strahlung ein Objekt reflektiert hängt u.a. von seiner Oberflächenbeschaffenheit ab. An einem Objekt können zwei Arten der Reflexion auftreten (Abb. 4.4).

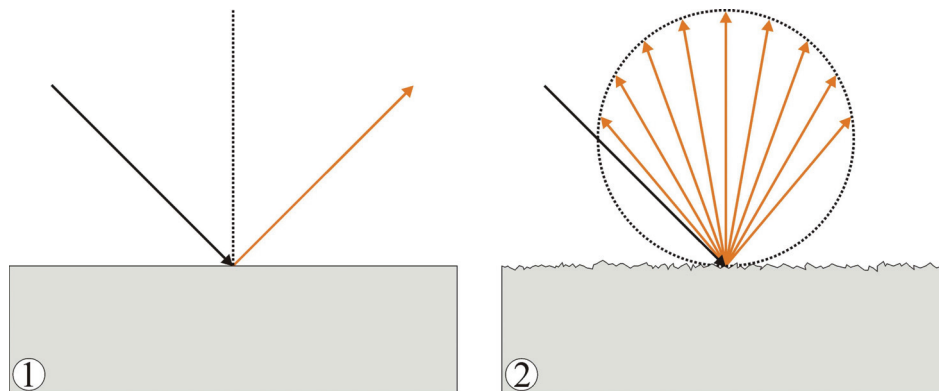


Abbildung 4.4: Gerichtete (1) und diffuse (2) Reflexion (verändert nach Kern, 2003). In schwarz ist der einfallende Strahl gekennzeichnet, in orange die reflektierten Strahlen.

Die gerichtete Reflexion beschreibt einen Fall, bei dem die auftreffende Strahlung in eine diskrete Richtung von der Quelle weg reflektiert wird und keine Strahlung zurück zur Quelle gelangt. Eine gültige Messung ist daher nur bei senkrechtem Auftreffen des Laserstrahls auf das Objekt möglich. Die gerichtete Reflexion folgt dabei dem allgemeinen Reflexionsgesetz, wonach der Reflexionswinkel gleich dem Einfallswinkel ist. Gerichtete Reflexion tritt nach Heritage und Large (2009) bei Objekten auf, deren Oberflächenrauigkeit kleiner ist als die Wellenlänge der auftreffenden Strahlung. Ist umgekehrt die Oberflächenrauigkeit eines Objektes größer als die Wellenlänge der auftreffenden Strahlung, kommt es zur so genannten Lambertschen oder diffusen Reflexion. Bei dieser Art der Reflexion wird die Strahlung in alle

Richtungen reflektiert (Abb. 4.4), wobei die Hauptreflexion senkrecht zur Objektoberfläche erfolgt (Petrie und Toth, 2009). In der Natur treten nur in den seltensten Fällen die Reinformen der beiden Reflexionstypen auf. Die meisten Objekte zeigen eine Mischform von diffuser und gerichteter Reflexion. Die Art der Reflexion hat, solange ein Teil der ausgesendeten Strahlung wieder zum Messinstrument zurück gelangt, keinen Einfluss auf die Präzision der Streckenmessung (Kern, 2003).

OBJEKT BESCHAFFENHEIT

Neben der Oberflächentopographie, die direkten Einfluss auf die Reflexionsart hat, beeinflussen auch Farbe und Materialart die Stärke des reflektierten Signals. Diese beiden Faktoren (Formel 4.5) beeinflussen die absorbierte Strahlungsenergie und die transmittierte Strahlungsenergie. Die Farbe eines Objektes ist abhängig davon, welche Wellenlängen von dessen Material absorbiert bzw. transmittiert und welche reflektiert werden. Das Absorptionsspektrum verschiedener Materialien ist nicht gleich verteilt, so dass manche Wellenlängen stärker absorbiert werden als andere, wodurch der individuelle Farbeindruck des Objektes entsteht. Trifft der Laserstrahl auf ein Objekt welches im Farbspektrum nahe an der Wellenlänge des Laserlichtes liegt, wird ein besonders hoher Anteil der Strahlung reflektiert.

Neben dem Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Art der Reflexion, führt eine extrem unregelmäßige Oberfläche (z.B. eine Rasenfläche) dazu, dass der Laserstrahl keinen diskreten Punkt (z.B. einen Punkt nur auf einem Grashalm oder nur am Boden) trifft, sondern teilweise in die Oberflächenstruktur eindringt. Dies führt zu einer Mittelung der Entfernungsmessungen und zu einer Ungenauigkeit in der Messung. Inhomogen aufgebaute Objektoberflächen wie z.B. Sandflächen können zudem zu geringerer Reflexion führen, da der Laserstrahl teilweise in die Oberfläche eindringt, an mehreren Grenzflächen gestreut wird und nicht mehr zum Messgerät reflektiert werden kann. Ähnliche Erscheinungen können bei teiltransparenten Oberflächen wie z.B. Marmor (Levoy et al., 2000) auftreten, bei denen es zur Interaktion des Laserstrahls mit dem oberflächennahen Bereich des Objektes kommt.

OBJEKT UNABHÄNGIGE FAKTOREN

Ein Lasersignal wird zusätzlich durch das Ausbreitungsmedium beeinträchtigt. Die Geschwindigkeit des Laserlichtes wird durch Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und die chemische Zusammensetzung der Luft beeinflusst (Kern, 2003). Da die Entfernungsmessung von der Geschwindigkeit des Lichtes im Vakuum ausgeht, muss das Ergebnis um einen Korrekturwert berichtet werden. Kern (2003) geht in seiner Arbeit von Korrekturwerten von ± 10 ppm unter Normalbedingungen aus und sieht daher bei normalen Zieldistanzen um ca. 30 m keinen Korrekturbedarf, da man sich innerhalb der instrumentellen Messungenauigkeit befindet. Für Extrembedingungen z.B. hohe Temperaturen sieht Kern (2003) jedoch im Einzelfall die Notwendigkeit einer Korrektur.

Charlton et al. (2009) beschreiben noch weitere atmosphärische Einflüsse auf eine Messung mit einem Laserscanner. Direkte Sonneneinstrahlung auf ein Zielobjekt kann bei einer hochreflektiven Oberfläche, zur Messung von übergroßen Reflektivitätswerten führen. Regen oder Nebel kann zu Streueffekten bei ausgesendetem und reflektiertem Signal führen. Zudem werden durch Wassertropfen oftmals Punkte zwischen Messgerät und eigentlichem Zielobjekt detektiert. Gleiche Effekte konnten bei den Messungen zu dieser Arbeit, durch Staub und Insekten verursacht, beobachtet werden.

4.3 Lasersicherheit

Die Energiedichte von Laserlicht kann für den Menschen gesundheitsgefährdende Werte erreichen (Kern, 2003). Der Grad der Gefährdung ist abhängig von der ausgesendeten Wellenlänge, der Energiedichte, der Einwirkdauer und der Art und Beschaffenheit des bestrahlten Materials. Bei den in Vermessungsgeräten verbauten Lasern werden Energiedichten und Wellenlängen verwendet, die den menschlichen Organismus nur beim Auftreffen in das Auge schädigen können (Kern, 2003), da die Augenlinse den Laserstrahl zusätzlich fokussieren kann. In Deutschland werden Laser nach DIN-60825-1 (2008) in sieben Klassen eingeteilt (Tabelle 4.1). Hierbei wird neben der Wellenlänge und der Leistung der Lasers (GZS-Wert) auch die maximal zulässige Bestrahlung (MZB-Wert) verwendet, die in der Unfallverhütungsvorschrift BGV B2 „Laserstrahlung“ für verschiedene Wellenlängen, Entfernungen und Laserquellen definiert wird.

Tabelle 4.1: Laserklassen in Deutschland (nach DIN-60825-1 (2008)).

| Klasse | Grundkonzept | Wellenlänge (nm) | Grenzwert der zugänglichen Strahlung (GZS) (mW) |
|--------|---|--|---|
| 1 | augensicher | alle | Wellenlängenabhängig |
| 1M | augensicher ohne Verwendung optischer Instrumente; unsicher bei Verwendung optischer Instrumente | 302,5 - 4000 | Wellenlängenabhängig |
| 2 | augensicher durch Abwendungsreaktion plus Lidschlussreflex | 400-700 | 1 |
| 2M | Lidschlussreflex; je nachdem, ob es sich um einen divergenten oder aufgeweiteten Strahl handelt, kann er mit optischen Instrumenten unsicher sein | 400-700 | 1 |
| 3R | Überschreitet die maximal zulässige Bestrahlung; die Strahlung ist max. fünfmal höher als der Grenzwert der zulässigen Strahlung von Klasse 1 (bzw. Klasse 2); das Risiko ist etwas geringer als in der Klasse 3B | 400 - 700; 302,5 - 400; 700 -1000000 | 5 |
| 3B | Alte Klasse 3 B ohne 3 R. Der Blick in den Laser ist gefährlich. Diffuse Reflexionen werden als ungefährlich eingestuft. | alle | 500 |
| 4 | Alte Klasse 4 Auch diffuse Reflexion ist für Augen gefährlich. Zusätzlich ist Brandgefahr und Gefahr für die Haut möglich. | alle | >500 |

Der in dieser Arbeit verwendete Laserscanner nutzt einen Laser mit der Wellenlänge $\lambda=785$ nm, einer Leistung von 20 mW und einer maximalen Pulsdauer von 0.008 s. Er wird damit in die Laserklasse 3R eingeordnet Für den Betrieb im Gelände bedeutet dies, dass ein von der gewählten Auflösung abhängiger Augensicherheitsabstand (Tabelle 4.4b) eingehalten werden muss, innerhalb dessen der Aufenthalt nur mit Augenschutz erlaubt ist. Bei allen Messungen für diese Arbeit musste, wenn das Gelände für unbeteiligte Personen zugänglich war, das Gelände um den Scanner in ausreichendem Abstand abgesperrt werden.

4.4 Entfernungsmessung mit einem Lasermesssystem

Mit Lasermesssystemen ist es möglich, durch die Beobachtung von ausgesendetem und empfangenem Signal, präzise Längen- und Zeitmessungen durchzuführen (Kern, 2003). Um mittels Laserlicht Informationen darzustellen, werden in der Regel auf die Trägerfrequenz des Laserstrahls zusätzliche Signale aufmoduliert. Diese Signale können amplitudenmoduliert, frequenzmoduliert oder phasenmoduliert sein (Kern, 2003). Neben den verschiedenen Modulationsverfahren unterscheiden sich Lasermesssysteme aufgrund des Messverfahrens und ihrer Bauweise. Wichtig ist hierbei, dass sich die Messverfahren und Bautypen für unterschiedliche Distanz- und Anwendungsbereiche eignen. Da es bislang kein universell einsetzbares Gerät gibt, das sämtliche Anforderungen der verschiedenen Fragestellungen erfüllt, ist die Auswahl des Messgerätes einer der wichtigsten Punkte für Studien die Laserscanning beinhalten (Fröhlich und Mettenleiter, 2004).

IMPULSLAUFZEITVERFAHREN

Beim Impulslaufzeitverfahren wird die Entfernung zu einem Objekt über die Laufzeit eines vom Messgerät emittierten und vom Objekt reflektierten Laserimpulses bestimmt. Durch eine Blende, Amplitudenvariation oder Modenkopplung wird vom Messgerät ein Laserimpuls mit festgelegter Frequenz ausgesendet. Nach einer Laufzeit Δt wird der vom Objekt reflektierte Impuls wieder vom Gerät detektiert. Über die Lichtgeschwindigkeit c , kann so die Distanz s zum reflektierenden Objekt bestimmt werden.

$$s = \frac{\Delta t \cdot c}{2} \quad (4.7)$$

Da das Impulslaufzeitverfahren auch für große Distanzen (bis 2500 m) eingesetzt werden kann, ist bei der Laufzeitmessung ein Korrekturfaktor für die atmosphärischen Einflüsse auf die Lichtgeschwindigkeit zu berücksichtigen (Kern, 2003). Nach Lerma et al. (2008) ist beim Impulslaufzeitverfahren die präzise Zeitmessung ausschlaggebend für die Genauigkeit der Streckenmessung. Geht man unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors von einer Lichtgeschwindigkeit von ~ 300.000 km/s bzw. ~ 0.3 m/ns aus, braucht das Licht um eine Strecke von einem Meter zurückzulegen 3.33 ns. Um eine Entfernungsgenauigkeit von einem Millimeter zu erreichen, muss das Gerät also in der Lage sein, Zeitunterschiede von 3.33 ps zu detektieren (Lerma et al., 2008). Für eine eindeutige Entfernungsmessung ist es zudem wichtig, dass die gemessene Laufzeit Δt größer als die Impulsdauer t_{Puls} ist.

$$\Delta t > t_{\text{Puls}} \quad (4.8)$$

Für die maximal erreichbare Entfernungsauflösung Δs gilt nach Lerma et al. (2008):

$$\Delta s > \frac{c \cdot t_{\text{Puls}}}{2} \quad (4.9)$$

Es zeigt sich also, dass die Entfernungsauflösung unmittelbar von der Impulsdauer, die das Gerät generiert und dem Zeitabstand, den das Gerät detektieren kann, abhängig ist. Laserscanner die das Impulslaufzeitverfahren nutzen, messen zu einem diskreten Zeitpunkt immer einen diskreten Punkt im Messfeld. Dadurch wird die Impulswiederholungsrate

begrenzt, da ein neuer Impuls erst wieder ausgesendet werden kann, wenn der vorhergehende detektiert wurde (Lerma et al., 2008).

Ein großer Vorteil der Messung mittels des Impulslaufzeitverfahrens ist die große Entfernung (bis 2500 m), die durch die hohe Leistung der Laserimpulse erreicht werden kann (Lerma et al., 2008). Bei genauer Analyse der einzelnen Impulse und Bestimmung der Laufzeiten von ansteigender Flanke des Impulses und abfallender Flanke, können zudem zwei Ziele in unterschiedlicher Entfernung gleichzeitig detektiert werden. Diese Methode wird z.B. bei Vermessung aus einem Fluggerät (Airborne oder Aerial Laser Scanning) genutzt, die Vegetationshöhe zu bestimmen (Kern, 2003). Zudem ist die Möglichkeit gegeben, trotz Vegetation die Geländeoberfläche zu vermessen.

Zu den Nachteilen der Methode zählen vor allem der hohe technische Aufwand, um durch kurze Detektionszeiten eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen und die zusätzlichen Messungen, die notwendig werden um den atmosphärischen Einfluss auf die Entfernungsmessung berücksichtigen zu können (Fröhlich und Mettenleiter, 2004). Ein weiterer Nachteil ist die im Vergleich zu anderen Messverfahren langsame Messgeschwindigkeit (<50000 pt/s). Bei der Konstruktion von Geräten für große Entfernungen (Long-range Laserscanner) muss zudem hoher technischer Aufwand betrieben werden, damit das generierte Laserlicht eine möglichst geringe Strahldivergenz aufweist.

TRIANGULATIONSVERFAHREN

Das Triangulationsverfahren basiert auf geometrischen Grundprinzipien (Kern, 2003). Das Prinzip der Triangulation beruht im Wesentlichen auf dem Satz des Thales von Milet (6. Jahrh. v.Chr.)(Abb. 4.5).

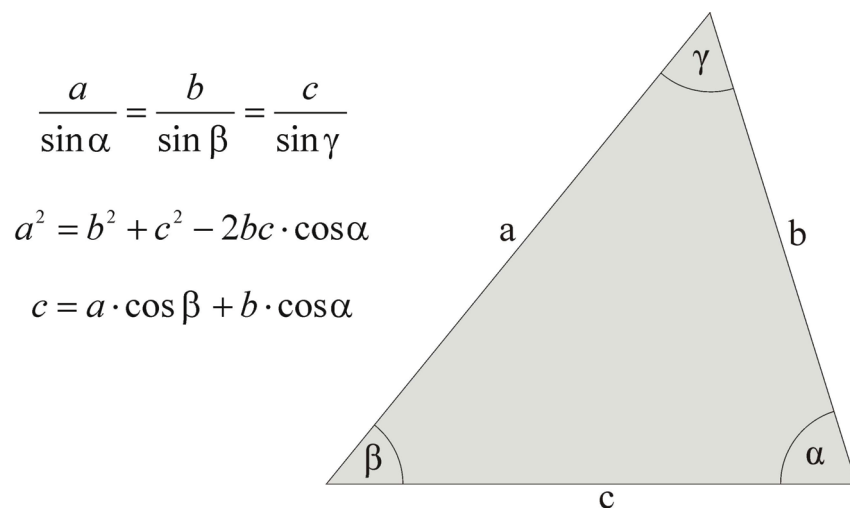


Abbildung 4.5: Grundprinzipien der Triangulation (verändert nach Lerma et al., 2008).

Beim Triangulationsverfahren wird mit einem Laser ein Raster, auf das zu vermessende Objekt, projiziert (Abb. 4.6.). Gleichzeitig zeichnet eine Kamera die genaue Position des Rasters auf der Oberfläche des Objektes auf. Da hierbei der Abstand (Basis, Abb. 4.6) zwischen der Kamera und dem Laser sowie der Winkel (α , Abb. 4.6) zueinander bekannt ist, kann zwischen Laser, Projektionsraster und Kamera ein Dreieck konstruiert werden. Durch die Variation der Entfernung zum Messobjekt, verändert das Projektionsraster seine Position im Kamerasichtfeld. Über diese Position lässt sich der Winkel des einfallenden Laserstrahls

zur Grundlinie bestimmen (β , Abb. 4.6). Über die nun bekannten Winkel und die Länge der Grundlinie, lässt sich die Entfernung zum Objekt bestimmen (Lerma et al., 2008). Da der Laser und die Kamera eine ausreichend große Überlappung im Sichtfeld benötigen, kann die Länge der Grundlinie nicht übermäßig verlängert werden. Diese Limitation führt dazu, dass Triangulationslaserscanner einen Entfernungsbereich von wenigen Metern (Fröhlich und Mettenleiter, 2004) und einen Messbereich von ca. 1 x 1 m (Cignoni und Scopigno, 2008) abdecken.

Der Vorteil des Triangulationsverfahrens ist die hohe Genauigkeit der Messung bis in den Mikrometerbereich. Der Nachteil des eingeschränkten Messbereiches führt bei größeren Objekten zu einer großen Anzahl von Einzelscans und verursacht dadurch einen großen logistischen und zeitlichen Aufwand (Levoy et al., 2000).

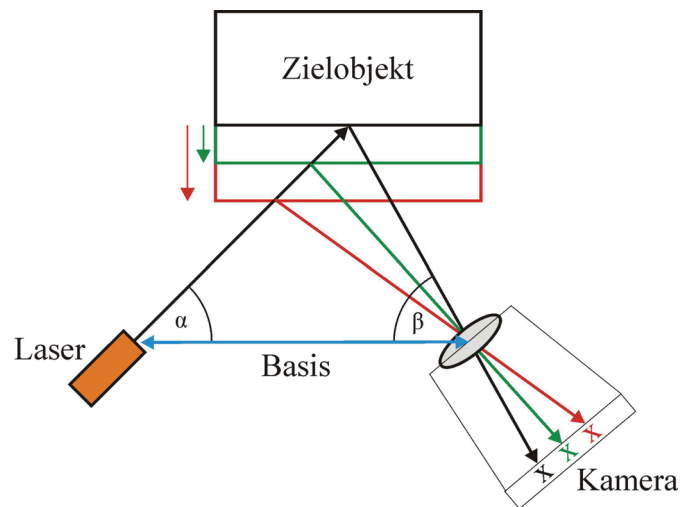


Abbildung 4.6: Funktionsweise eines Triangulationslaserscanners (verändert nach Lerma et al., 2008).

PHASENDIFFERENZVERFAHREN

Das Phasendifferenzverfahren nutzt zur Entfernungsbestimmung den Phasenunterschied zwischen ausgesendetem und empfangenen Signal (Boehler und Marbs, 2002)(Abb. 4.7).

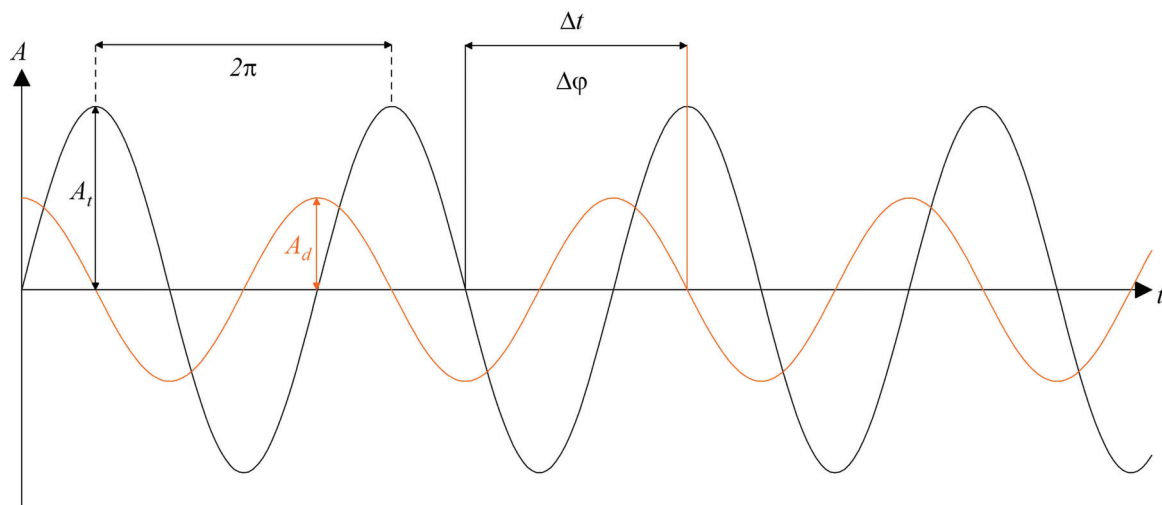


Abbildung 4.7: Unterschied des gesendeten (schwarz) und empfangenen (orange) Signals beim Phasendifferenzverfahren (verändert nach Kern, 2003).

Das Phasendifferenzverfahren zählt zu den Dauerlichtverfahren, da hierbei ein Lasersignal kontinuierlich ausgesendet wird. Das ausgesendete Trägersignal besitzt hierbei eine sinusförmige Amplitudenmodulation $\Sigma_t(t)$ mit einer festgelegten Frequenz f_m (Kern, 2003).

$$\Sigma_t(t) = A_t \sin(2\pi f_m t) \quad (4.10)$$

Nach Kern (2003) ist A_t die maximale Amplitude des ausgesendeten Signals. Das Signal wird am Messobjekt reflektiert und am Gerät zeitversetzt um Δt detektiert. Gemäß Formel 4.7 ergibt sich:

$$\Delta t = \frac{2s}{c} \quad (4.11)$$

Das empfangene Signal $\Sigma_d(t)$ weist daher die Phasendifferenz $\Delta\varphi$ auf (Abb. 4.5).

$$\Sigma_d(t) = A_d \sin(2\pi f_m t + \Delta\varphi) \quad (4.12)$$

Die Phasendifferenz wird genutzt um über die Kreisfrequenz ω die Laufzeit Δt zu ermitteln.

$$\Delta\varphi = \omega \cdot \Delta t \quad (4.13)$$

mit

$$\omega = 2\pi f_m$$

ergibt sich

$$\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_m} \quad (4.14)$$

Mit Gleichung 4.11 kann die Distanz zum Zielobjekt ermittelt werden.

$$\frac{2s}{c} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_m}$$

$$s = \frac{\Delta\varphi}{4\pi f_m} c$$

mit

$$\lambda_m = \frac{c}{f_m}$$

ergibt sich

$$s = \frac{\lambda_m}{4\pi} \Delta\varphi \quad (4.15)$$

Die Genauigkeit der Streckenmessung ist daher proportional zur genutzten Wellenlänge λ_m (Kern, 2003). Bei kleineren Wellenlängen wirkt sich die Ungenauigkeit der Phasendifferenz geringer auf die Ungenauigkeit der Streckenmessung aus (Thiel und Wehr, 2004). Dieser Zusammenhang führt zu einem Genauigkeitsvorteil gegenüber dem Impulslaufzeitverfahren

(Kern, 2003). Da beim Phasendifferenzverfahren eine Messung nur im Bereich zwischen 0 und 2π eindeutig ist, können mit diesem Verfahren nur Distanzen bis zu einer Maximalentfernung s_{\max} zum Zielobjekt gemessen werden (Kern, 2003):

$$s_{\max} = \frac{1}{2} \lambda_m \quad (4.16)$$

Die Phasendifferenzmessung liefert für alle Entfernungen s_n , die sich aus dem ganzzahligen Vielfachen der halben Modulationswellenlänge $\lambda_m/2$ (Formel 4.16) und einer Restentfernung s (Formel 4.15) zusammensetzen, ein Ergebnis.

$$s_n = n \frac{\lambda_m}{2} + \frac{\lambda_m}{4\pi} \Delta\varphi \quad n = 1, 2, 3... \quad (4.17)$$

Diese Eigenschaft kann zu einer Mehrdeutigkeit der Ergebnisse führen, daher werden in der Regel gleichzeitig mehrere Modulationswellenlängen genutzt, um die Messung dem korrekten Phasenzyklus zuordnen zu können.

Der Vorteil des Phasendifferenzverfahrens liegt, neben der gegenüber dem Impulslaufzeitverfahren erhöhten Auflösung, in der schnellen Aufzeichnungsrate von bis zu 1.000.000 pt/s. Der Entfernungsbereich moderner Geräte erstreckt sich von ca. 0.5 – 185 m.

4.5 Geräte

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die unterschiedlichen Messverfahren vorgestellt, die von den meisten Lasermessgeräten genutzt werden. Die Messgeräte unterscheiden sich zudem konstruktionsbedingt voneinander. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist der Einsatzbereich. Laserscanner werden als stationäre, mobile oder fahrzeugbasierte Systeme an Land (Terrestrial Laser Scanning) oder als Einbau in ein Fluggerät (Flugzeug, Helikopter, UAV etc.) für die Vermessung aus der Luft verwendet. Unabhängig von der Bauart und dem Einsatzgebiet ist das Ergebnis einer Vermessung mit einem Laserscanner immer eine dreidimensionale Punktwolke um das Messgerät. Zunächst liegen die Punkte als Polarkoordinaten in einem lokalen Koordinatensystem um den Gerätestandpunkt vor (Abb. 4.8).

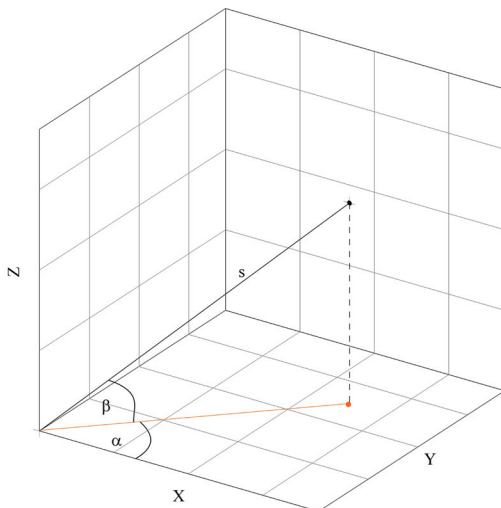


Abbildung 4.8: Zusammenhang zwischen Polar- und Kartesischen Koordinaten (verändert nach Heritage und Large, 2009).

Da der Gerätestandpunkt, die Entfernung zu den einzelnen Punkten sowie die geräteinternen Winkel in denen der Laserstrahl in der Horizontalen und Vertikalen ausgesendet wurde bekannt sind, können die Polarkoordinaten in Kartesische Koordinaten umgewandelt werden (Abb. 4.8). Mit dem Gerätestandpunkt als Ursprung $(0_x, 0_y, 0_z)$, dem horizontalen Abstrahlwinkel α und dem vertikalen Abstrahlwinkel β können die Koordinaten über die folgenden Formeln transformiert werden (Heritage und Large, 2009).

$$x = \sin \alpha \cdot s \quad (4.18)$$

$$y = \cos \alpha \cdot s \quad (4.19)$$

$$z = \sin \beta \cdot s \quad (4.20)$$

In einem weiteren Schritt kann die nun in kartesischen Koordinaten vorliegende Punktwolke über Referenzpunkte in ein globales Koordinatensystem überführt werden. Für jeden diskreten Punkt liegt neben den Koordinaten ein Reflektivitätswert vor, der auf dem Verhältnis ρ zwischen detektierter und ursprünglich ausgesendeter Strahlungsleistung beruht (Formel 4.6).

SPIEGELTYPEN

Bei den meisten Laserscannern wird der Laserstrahl über einen beweglichen Spiegel in das Messfeld gelenkt (Lerma et al., 2008), da es wesentlich einfacher ist einen Spiegel mit der nötigen Genauigkeit und Geschwindigkeit zu bewegen, als den kompletten Laser. Die Geräte unterscheiden sich hierbei in der Spiegelgeometrie. Es kommen oszillierende bzw. rotierende Planspiegel, rotierende Spiegelpolygone sowie linear angeordnete Glasfaserbündel zum Einsatz (Brenner, 2006). Teilweise werden auch rotierende Prismen eingesetzt, die den Laserstrahl nicht reflektieren, sondern um einen diskreten Betrag ablenken (Kern, 2003).

BAUTYPEN

Nach Kern (2003) und Staiger (2003) lassen sich Laserscanner in zwei bzw. drei unterschiedliche Bautypen einordnen (Abb. 4.9).

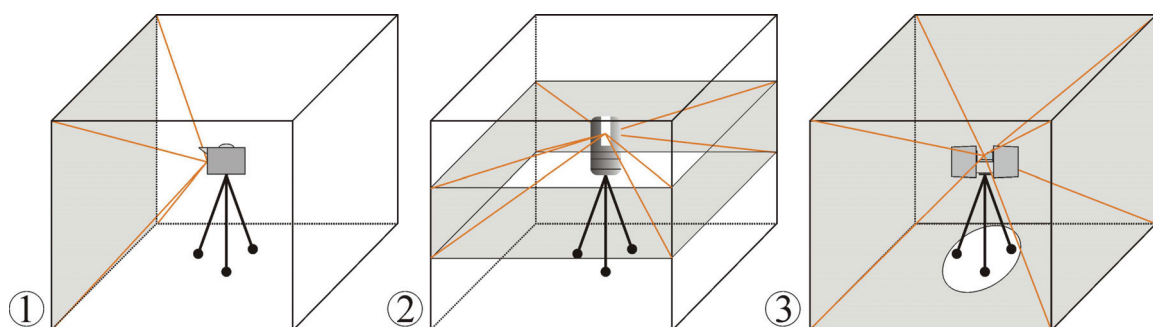


Abbildung 4.9: Erfassungsbereich eines Kamerascanners (1), eines Hybridscanners (2) und eines Panoramascanners (3) (verändert nach Staiger, 2003).

Ein Kamerascanner kann nur einen vor dem Scan festgelegten, begrenzten Bereich vermessen (Abb. 4.9, 1). Der Laser wird nur im Messbereich des Scanners bewegt. Diese Bauart wird vor allem bei Geräten mit Impulslaufzeitverfahren eingesetzt, die für große Entfernungen ausgelegt sind. Sollen beispielsweise Innenansichten von Gebäuden aufgenommen werden,

müssen mit einem Kamerascanner mehrere Scans durchgeführt werden, um das gesamte Objekt zu erfassen.

Ein Panoramascanner besitzt ein Sichtfeld, das nur durch sein eigenes Gehäuse bzw. die Vorrichtung zum Aufstellen des Gerätes begrenzt ist (Abb. 4.9, 3). Hierbei dreht sich der Scanner während der Aufnahme um 360° um seine vertikale Achse. Gleichzeitig wird der Laserstrahl um die horizontale Achse durch das gesamte freie Sichtfeld bewegt, welches nicht vom Gehäuse abgeschattet wird (in der Regel 300° - 320°).

Als dritten Bautyp klassifiziert Staiger (2003) den Hybridscanner. Der Hybridscanner kann sich während der Messung um 360° um eine Achse (meist die Vertikale) drehen, während das Sichtfeld in der anderen Ebene eingeschränkt ist (Abb. 4.9).

AUSWAHL DES RICHTIGEN GERÄTES

Die vorangegangenen Kapitel haben beschrieben, dass es unterschiedliche Laserscanner gibt, die sich im Messverfahren und in der Bauart unterscheiden. Jeder dieser unterschiedlichen Scanner hat einen Anwendungsbereich, für den das eingesetzte Messverfahren und die Bauart von Vorteil sind. Gleichzeitig zeigt sich jedoch, dass unbefriedigende Ergebnisse erzielt werden, wenn Scanner außerhalb ihrer optimalen Anwendungsbereiche genutzt werden. Es ist daher notwendig vor einer Studie, in der Laserscanning als Werkzeug genutzt werden soll, die Aufgabenstellung klar zu definieren, um das richtige Gerät auswählen zu können. Um diese Auswahl treffen zu können, müssen zunächst einige Fragen beantwortet werden:

- (1) Welche Art von Objekt soll erfasst werden (z.B. Küstenlinie, Steinbruch, Gebäude, Statue)?
- (2) Welches Ziel hat die Anwendung des Laserscanners in der Studie (z.B. Aufnahme der Morphologie, Identifikation stratigraphischer Einheiten ggf. Volumenabschätzungen, Aufnahme von Bauschäden, Aufnahme von Oberflächentexturen)?
- (3) Welche minimale Auflösung ist zur Beantwortung der Fragestellung notwendig?

Die Beantwortung dieser Fragen grenzt die Auswahl an Scannertypen für die vorliegende Problemstellung ein. Tabelle 4.2 zeigt eine Übersicht über die gängigsten Scannerarten und ihre Anwendungsbereiche.

Neben den genannten Auswahlkriterien, spielen zudem logistische, finanzielle und zeitliche Faktoren bei der Planung einer Messkampagne, eine entscheidende Rolle.

Tabelle 4.2: Eigenschaften verschiedener Scannertypen.

| Messverfahren | Sichtfeld | maximaler Entfernungsbereich (m) | Entfernungsauflösung (mm) | Messgeschwindigkeit (pt/s) | Anwendungsbeispiele |
|-----------------|---------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------|---|
| Triangulation | Kamera | 0.1-6 | <0.1 | 350.000-1.000.000 | Oberflächen, Artefakte, Qualitätskontrolle |
| Phasendifferenz | Panorama | 20 | <1 | >1.000.000 | Vermessung von Räumen, größere Denkmäler, Industrie |
| Phasendifferenz | Panorama | 185 | 0.1-0.5 | >1.000.000 | Räume, Gebäude, geolog. Strukturen |
| Impulslaufzeit | Hybrid | 200 | 5-20 | 5.000-30.000 | Gebäude, geolog. Strukturen |
| Impulslaufzeit | Kamera/Hybrid | 400-1000 | 5-20 | 10.000-20.000 | Geomorphologie, Steinbrüche |
| Impulslaufzeit | Kamera | 1000-3000 | 10-200 | 10.000-50.000 | Geomorphologie, Geländemodelle |
| Impulslaufzeit | ALS/Kamera | 1500-5000 | 25-350 | Messfrequenz 70-630 Hz | Geländemodelle, Vegetationskartierung |

Die beschriebenen Faktoren zeigen, wie wichtig die Wahl des richtigen Gerätes für eine Studie ist. Die Kartierung z.B. einer Bergflanke mit einem Nahbereichs-Phasenlaserscanner oder die Vermessung z.B. eines archäologischen Befundes mit einem Fernbereichs-Impulslaserscanner werden nicht zu den gewünschten Ergebnissen führen.

Bei den Planungen für das Projekt in der Archäologischen Zone Köln zeigte sich, dass zwar ein relativ großes Areal aufgenommen werden muss, der Arbeitsbereich für die einzelnen Scans jedoch begrenzt ist. Ein Großteil der Vermessung musste zudem im laufenden Grabungsbetrieb erfolgen. Dies erforderte eine schnelle Datenerfassungsrate des Gerätes. Die angestrebte Auflösung lag bei 0.5-2 mm. Impulslaufzeitsscanner konnten daher, aufgrund der Auflösung und der Akquisitionsrate ausgeschlossen werden. Triangulationslaserscanner erfassen einen Zielbereich von ca. 1 x 1 m (Cigoni and Scopigno, 2008), was in dieser Studie zu einer großen Anzahl von Scans in einer nicht benötigten Auflösung geführt hätte. Um die Anforderungen der Studie zu erfüllen, wurde der Phasenlaserscanner PHOTON 80 der Firma FARO ausgewählt. Phasenlaserscanner zeigen zwar einen eingeschränkten Entfernungsbereich, hier 76 m, jedoch überwiegen die Vorteile im Bereich der Aufzeichnungsrate und der Genauigkeit, was durch verschiedene Studien belegt wird (u.a. Broser, 2008; Acevedo Pardo et al., 2009; Kersten et al., 2010). Der maximale Entfernungsbereich von 76 m stellte bei den Untersuchungen in der Archäologischen Zone Köln keine Einschränkung dar, da in den archäologischen Grabungen die mittleren Zielweiten bei ca. 10 m lagen.

4.6 Anwendungen

Aufgrund des breiten Anwendungsspektrums der Laserscanningtechnik werden in diesem Kapitel ausgewählte Projekte aus dem Bereich der Geowissenschaften und der Archäologie bzw. Denkmalpflege vorgestellt. Diese decken jedoch nur einen kleinen Teil des gesamten Anwendungsspektrums in diesem Bereich ab.

Die Entwicklung der Lasermessgeräte führte in den letzten 30 Jahren dazu, dass Laserscanning auch außerhalb der traditionellen Geodäsie zu einem wichtigen Werkzeug wurde. Entscheidend für diese Entwicklung waren die zunehmend einfachere Bedienbarkeit der Geräte sowie deren Tauglichkeit für den Einsatz im Gelände (Größe, Witterungsbeständigkeit).

Terrestrisches Laserscanning wird zunehmend für die Kartierung geologischer Strukturen (z.B. Störungssysteme, Canyons) eingesetzt (u.a. Buckley et al., 2008; Engelkemeier und Khan, 2008; Pearce et al., 2006). Das Impulslaufzeitverfahren wird darüber hinaus für morphologische und topographische Anwendung sowie für die Kartierung großräumiger sedimentologischer Strukturen verwendet (u.a. Hancock et al., 2008; Heritage and Hetherington, 2007; Nagihara et al., 2004; Rosser et al., 2005). Für die Kartierung von großen Arealen werden fluggerätegestützte Systeme eingesetzt. Die gesammelten Daten dienen als Grundlage für hochauflösende digitale Geländemodelle. In einigen wissenschaftlichen Großprojekten wurden so Geländemodelle für ganze Regionen erstellt (u.a. GEON LIDAR z.B. Kim et al., 2006). Nationale und regionale Vermessungsämter nutzen Laserscandaten um detaillierte Oberflächeninformationen für die jeweiligen Gebiete bereitzustellen (z.B. Petzold et al., 1999).

Ein wichtiger Anwendungsbereich im Feld der Geowissenschaften ist die Überwachung und Untersuchung möglicher Gefahrenquellen. U.a. nutzten Du und Teng (2007) und Dunning et al. (2009) Laserscanning für die Untersuchung von Massebewegungen und der zeitlichen und räumlichen Detektion von Deformationen. Abellán et al. (2006, 2009) und Oppikofer et al. (2009) evaluierten die Technik für die detaillierte Kartierung von Berg- und Felsstürzen. Der Geologische Dienst der Vereinigten Staaten (USGS) und die Universität von Washington untersuchten mittels hochauflösenden 3D-Daten die Geomorphologie (u.a. Störungen, Paläoküstenlinien etc.) der Region um Seattle (USA), in Hinblick auf seismische Gefährdung (Haugerud et al., 2003). Hunter et al. (2003) nutzten Laserscanning für die Überwachung vulkanischer Aktivität am Ätna (Italien). Wiatr et al. (2009) setzten einen Impulslaufzeitlaser für die Untersuchung von Massenbewegungen, die Rekonstruktion von Sedimentationsprozessen und die Untersuchung von an der Oberfläche anstehenden Störungsflächen ein.

Verschiedene Arbeiten zeigen Anwendungsbeispiele für geotechnische Fragestellungen. Gonzáles-Aguilera et al. (2008) nutzte Laserscanning zur Überwachung eines Staudammes in Spanien, während Vežočník et al. (2009) die Technik mit gleicher Aufgabenstellung an einer Hochdruckgasleitung in Slowenien angewendet haben. Neben der Anwendung im Bereich der Geowissenschaften wird Laserscanning auch für die Aufnahme archäologischer Befunde und im Bereich der Denkmalpflege eingesetzt (Vozikis et al., 2004). Bislang wurden Gebäude (Al Kheder et al., 2009; Beraldin et al., 2004), komplette archäologische Komplexe (Balzani et al., 2004) und Bodendenkmäler (Bates et al., 2008) mittels Laserscanning aufgenommen. Steinzeitliche Wohnhöhlen wurden u.a. von Rütther et al. (2009) und Lerma et al. (2010) kartiert. El-Hakim et al. (2004) und Fryer et al. (2005) setzten hierbei den Schwerpunkt auf Höhlenmalereien und Gravuren in den Höhlenwänden. Bei archäologischen Fragestellungen wird Laserscanning häufig mit photogrammetrischen Techniken verknüpft, um zusätzliche Informationen durch hochauflösende Farbfotographien zu gewinnen (u.a. Drap et al., 2003; Neubauer et al., 2005; Lambers et al., 2007). Der Vorteil liegt hierbei in der Kombination der hohen Dichte von 3D-Punkten und der schnellen Akquisitionsrate des Laserscanners mit der Genauigkeit der Photogrammetrie. Oberflächen können entscheidende Farbnuancen zeigen, die mit dem Laserscanner alleine nicht festgehalten werden können. Für Studien deren

Fragestellung eine hohe Auflösung erfordert, werden Triangulationsscanner zur Erfassung von Kunstwerken und Artefakten eingesetzt (Levoy et al., 2000).

Die vorgestellten Arbeiten zeigen, dass bei der Vermessung von Geologie, Geomorphologie und großen architektonischen Objekten meist Impulslaserscanner zum Einsatz kommen, da allein die Abmessungen der Zielobjekte große Zielweiten erfordern. Bei Studien von Kunstobjekten oder kleineren archäologischen Funden, bei denen hohe Detailgenauigkeit gefordert wird, werden im Nahbereich Triangulationsscanner verwendet.

Der mittlere Entfernungs- und Auflösungsbereich, in dem Phasenlaserscanner zum Einsatz kommen, ist derzeit im Bereich der Geowissenschaften und der Archäologie unterrepräsentiert. Die Entwicklung der letzten Jahre bei den Phasendifferenzgeräten ist jedoch enorm, speziell im Hinblick auf den vergrößerten Entfernungsbereich und die Aufnahmezeit, so dass in Zukunft viele Anwendungen, für die zur Zeit noch Impulslaserscanner eingesetzt werden, durch Phasendifferenzgeräte abgedeckt werden können.

4.7 FARO Photon 80

Bei der Vermessung des archäologischen Inventars in der Archäologischen Zone Köln, konnte ein FARO Photon 80 Phasenlaserscanner genutzt werden (Abb. 4.10). Der Messbereich des Scanners reicht von 0.6 m bis zu einer Maximaldistanz von 76 m. Das Gerät hat eine Auflösung von 0.00076° in der Horizontalen und 0.009° in der Vertikalen, was in einer Entfernung von 10 m, 0.13 mm bzw. 1.57 mm entspricht. Die Distanzauflösung liegt laut Hersteller bei 0.6 mm mit einem systematischen Distanzmessfehler von ± 2 mm bei 25 m. Mit einem Sichtfeld von 360° in der Horizontalen und 320° in der Vertikalen lässt sich der Photon 80 als Panoramascanner klassifizieren. Tabelle 4.3 fasst die wichtigsten Kennwerte des Gerätes zusammen.

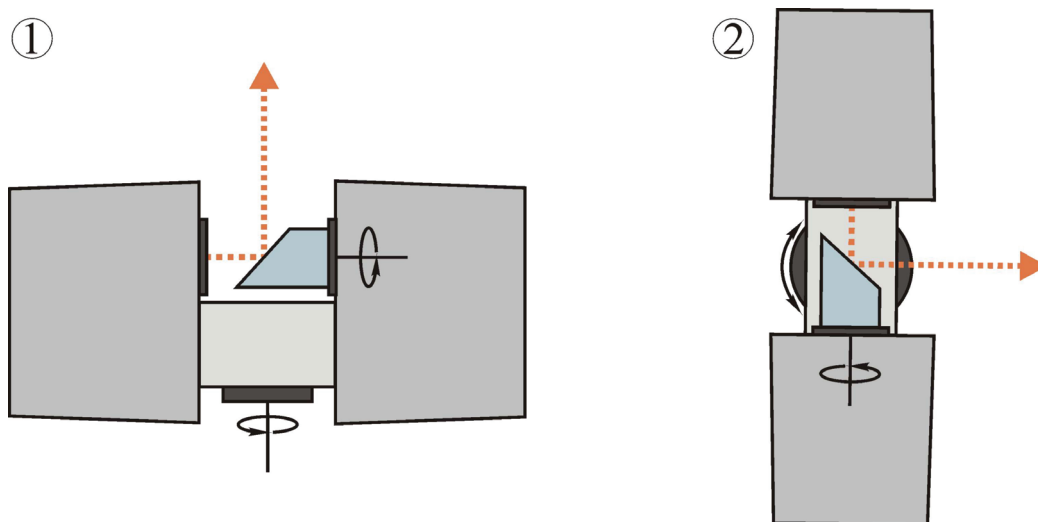


Abbildung 4.10: Aufbau des FARO Photon 80 in Frontansicht (1) und Aufsicht (2). In blau ist der rotierende Spiegel eingezeichnet, der den Laserstrahl (orange) ins Messfeld lenkt. In schwarz sind die Rotationsachsen des Gerätes markiert (verändert nach Rosellen, 2011).

Tabelle 4.3: Wichtigste Kennwerte des FARO Photon 80.

| | |
|--------------------------------------|--------------|
| Messbereich | 0.6 - 76 m |
| vertikales Sichtfeld | 320° |
| horizontales Sichtfeld | 360° |
| <u>Ablenkeinheit</u> | |
| vertikale Auflösung | 0.009° |
| horizontale Auflösung | 0.00076° |
| Winkelauflösung (vert./horiz.) | ±0.009° |
| max. Scangeschwindigkeit | 2880 U/s |
| <u>Laser</u> | |
| Wellenlänge | 785 nm |
| Strahldivergenz | 0.16 mrad |
| Strahldurchmesser | 3.3 mm |
| Laserleistung | 20 mW |
| Laserklasse | 3R |
| <u>Entfernungsmesseinheit</u> | |
| Auflösung | 0.6 mm |
| system. Distanzmessfehler | ±2 mm |
| Messrate | 120.000 pt/s |

Der Halbleiterlaser arbeitet mit Modulationswellenlängen von 76 m, 9.4 m und 1.2 m, um das Mehrdeutigkeitsproblem des Phasendifferenzverfahrens zu lösen (siehe Kap. 4.4). Dabei wird die Methode der Amplitudenmodulation verwendet (Abb. 4.11). Abbildung 4.12 verdeutlicht die Messung über diese drei Wellenlängen.

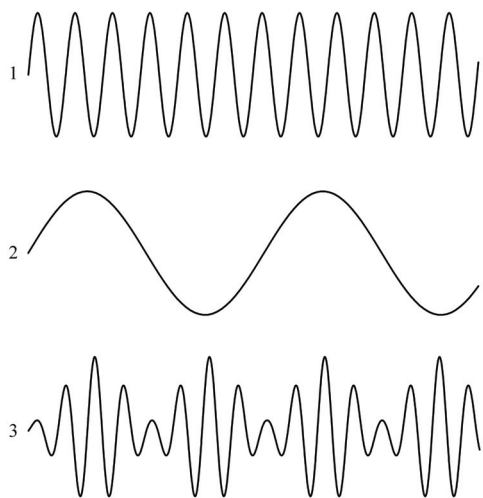


Abbildung 4.11: Verschiedene Signaltypen bei der Amplitudenmodulation. Das Modulationssignal (2) wird genutzt um die Amplitude des Trägersignals (1) zu variieren (3) (nach Petrie und Toth, 2009).

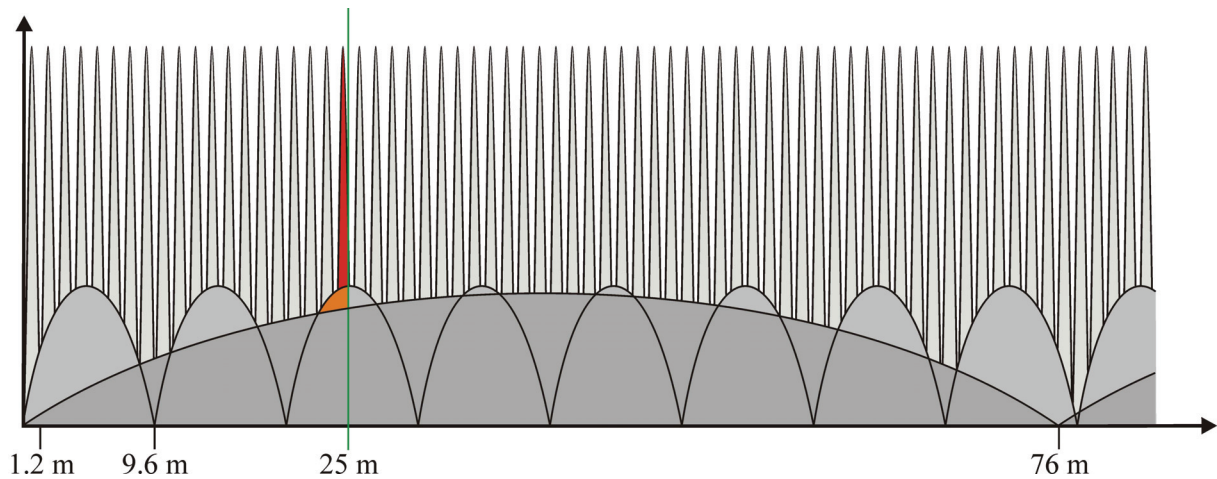


Abbildung 4.12: Darstellung der Modulationswellenlängen von 1.2 m, 9.6 m und 76 m des FARO Photon 80 mit einer Beispielmessung von 25 m (verändert nach FARO, 2005).

Die beiden größeren Wellenlängen werden genutzt, um den korrekten Wellenlängenzyklus der kürzesten Wellenlänge zu lokalisieren. In diesem wird die präzise Entfernungsmessung durchgeführt (FARO, 2005; Pfeifer und Briesse, 2007).

Der Photon 80 besitzt ein internes Inklinometer, das laut Herstellerangaben Neigungen von bis zu 15° , mit einer Genauigkeit von 0.1° ausgleichen kann. In einer, im Rahmen des Projektes, durchgeführten Diplomarbeit von S. Rosellen (2011) wurde der Arbeitsbereich des Inklinometers getestet. Nach Auswertung verschiedener Messreihen ergibt sich ein Arbeitsbereich von $\pm 14.2^\circ$.

Der Photon 80 besitzt eine Farboption, die eine Einfärbung der gemessenen Punktwolke ermöglicht. Hierzu wird mit einer speziellen Halterung eine digitale Spiegelreflexkamera (Nikon D200) mit einem 10.5 mm Fischaugenobjektiv und einer Auflösung von 10.2 Megapixeln auf dem Scanner montiert (Abb. 4.13).



Abbildung 4.13: Der FARO Photon 80 mit installierter Farboption (1). Im Gehäuse finden sich neben dem mechanischen Antrieb die Lasereinheit (2) und der integrierte PC (3). Der Scanner kann über einen Akku betrieben werden, der direkt unter dem Gehäuse befestigt wird (4). Die Farboption erfordert ein spezielles, höhenverstellbares Stativ (5), um die Kamera in die Position des Spiegels zu bewegen (Foto: K.-G. Hinzen, 2009).

Durch ein spezielles Stativ kann die Kamera, nach Aufzeichnung der 3D-Daten in die Position des rotierenden Spiegel gebracht werden. Somit wird die Farbinformationen aus der gleichen Perspektive wie die 3D-Daten aufgezeichnet. Die Aufnahmen werden direkt auf den Scanner übertragen und mit der jeweiligen Punktwolke in einer Projektdatei abgespeichert. Während der Aufbereitung der Daten (Kap. 4.7.2) können die Aufnahmen verwendet werden, um jedem Scanpunkt einen RGB-Wert (Rot/ Grün/ Blau) zuzuordnen, wodurch eine farbige Punktwolke generiert wird. Der RGB-Farbraum basiert auf der Zerlegung der Farben in die drei Grundfarben rot, grün und blau. Jede Farbe wird mit 8-bit durch Zahlen zwischen 0 und 255 angegeben, die additiv die jeweilige Farbe erzeugen (Corel, 2002).

Die Datenverarbeitung während des Scanvorgangs wird von einem eingebauten PC mit Intel Pentium III (700 MHz) Prozessor, 256 MB Arbeitsspeicher und einer 80 GB Festplatte, durchgeführt. Die Datenspeicherung kann lokal auf dem integrierten PC oder durch Netzwerkübertragung (Ethernet oder W-Lan) auf einem externen Rechner erfolgen.

Die Ansteuerung des Scanners kann ebenfalls über ein externes Gerät auf dem ein Internetbrowser installiert ist (PC, Handheld, Mobiltelefon) kabelgebunden oder kabellos erfolgen. Ist der Scanner vorkalibriert (Einstellungen zur Auflösung, Benennung der Dateien etc.) kann der Scanvorgang auch über das Bedienfeld am Gerät gestartet und gestoppt werden. Vor dem Scanvorgang kann die gewünschte Auflösung des Scans gewählt werden. Die Tabellen 4.4a und b zeigen die wichtigsten Parameter für die verschiedenen Auflösungsstufen.

Tabelle 4.4a: Laserparameter des FARO Photon 80 bei verschiedenen Auflösungsstufen.

| Auflösungsstufe | Wiederholungsrate (Hz) | Pulsdauer (ms) | Auflösung (mm in 10m) | Auflösung pt/° |
|-----------------|------------------------|----------------|-----------------------|----------------|
| 1/1 | 3 | 7.60 | 1.57 | 111.11 |
| 1/2 | 6 | 3.80 | 3.14 | 55.56 |
| 1/4 | 12 | 1.90 | 6.28 | 27.78 |
| 1/5 | 15 | 1.52 | 7.85 | 22.22 |
| 1/8 | 24 | 0.95 | 12.57 | 13.89 |
| 1/10 | 30 | 0.76 | 15.71 | 11.11 |
| 1/16 | 48 | 0.48 | 25.13 | 6.94 |

Tabelle 4.4b: Systemparameter des FARO Photon 80 bei verschiedenen Auflösungsstufen.

| Auflösungsstufe | Dateigröße (MB) | Akquisitionsdauer | Augensicherheitsabstand (m) |
|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------------------|
| 1/1 | 1346.86 | 1:51:07 | 16.1 |
| 1/2 | 336.73 | 0:27:47 | 16.1 |
| 1/4 | 84.20 | 0:06:57 | 9.4 |
| 1/5 | 53.90 | 0:04:27 | 7.5 |
| 1/8 | 21.06 | 0:01:44 | 4.7 |
| 1/10 | 16.48 | 0:01:07 | 3.8 |
| 1/16 | 5.27 | 0:00:26 | 2.4 |

Neben Einstellungen zur Dateibenennung, Projektart etc. kann im Vorfeld der Scanbereich eingeschränkt werden. Dies kann die Akquisitionsdauer deutlich verringern. Die Angaben zu Dateigröße und Akquisitionsdauer in Tabelle 4.4b, beziehen sich auf einen einfachen Scan ohne Farboption. Wird die Farboption gewählt, erhöht sich sowohl die Akquisitionsdauer, als auch die Dateigröße, da die Aufnahmen direkt in der Scandatei gespeichert werden.

Die Stromversorgung des Gerätes kann entweder kabelgebunden über das normale Stromnetz oder über einen Akku, der direkt unter dem Gerät auf das Stativ montiert wird, erfolgen (Abb. 4.13).

4.7.1 Datenerfassung

Bei der Datenerfassung mit dem FARO Photon 80, ist vor allem die Wahl des Standortes der einzelnen Scans entscheidend, für die Qualität und die Nutzbarkeit der Daten. Abhängig von der Standortwahl und der damit verbundenen Zielentfernung, ist die Auswahl der Auflösung mit der der Scan durchgeführt werden soll. Bei der Wahl der Auflösung werden zudem Faktoren wie das Ziel der Untersuchung und damit die minimal benötigte Auflösung berücksichtigt. Da in den meisten Fällen mehrere Scans notwendig sind, um ein Objekt komplett zu erfassen, ist das erste Kriterium für die Standortwahl eine ausreichende Überschneidung des Sichtfeldes zum benachbarten Scannerstandort. Damit ist sichergestellt, dass bei der nachfolgenden Verknüpfung der Einzelscans zu einem Gesamtmodell, ausreichend viele gemeinsame Punkte zur Verfügung stehen. Im Vorfeld einer Messkampagne müssen eventuell vorhandene Referenzpunkte im Messfeld durch Vermessungsspiegel oder Zielmarken kenntlich gemacht werden, um eine nachträgliche Georeferenzierung zu ermöglichen. Wenn die örtlichen Gegebenheiten keine ausreichende Überschneidung der Sichtfelder der verschiedenen Standorte zulassen, müssen zusätzliche Zielmarken sowie bei Bedarf Registrierkugeln eingesetzt werden (Abb. 4.14).

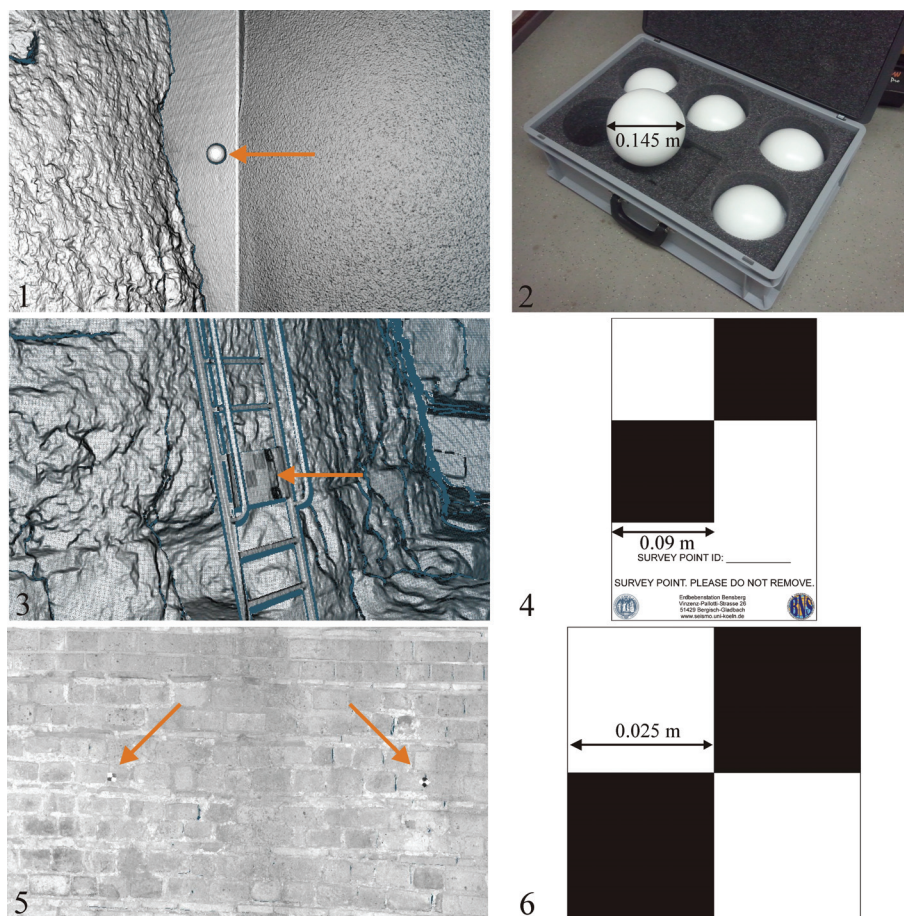


Abbildung 4.14: Verschiedene Zielmarken für die Scanregistrierung. (1) Registrierkugel im Scan und als Foto (2). (3) Schachbrettzielmarke im Scan und als Vorlage (2). (5) Kleinstzielmarken (Schachbrett) im Scan und als Vorlage (6).

Ist der Arbeitsbereich für den Publikumsverkehr zugänglich, muss der Augensicherheitsabstand durch Absperrung gewährleistet werden und nach Anlage 2 der Unfallverhütungsvorschrift „Sicherheits- und Gesundheitsschutzkennzeichnung am Arbeitsplatz (BGV A8) durch das Warnzeichen W 10 („Warnung vor Laserstrahl“, Abb. 4.15) gekennzeichnet sein.

Bei Messungen im Freien sollte zudem ein Regenschutz für das Messgerät bereitgestellt werden. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, kann mit der Datenerfassung begonnen werden. Bei der Erfassung mit mehreren Scans sind drei Grundvoraussetzungen zu erfüllen:

- (1) Die Anzahl der Scans muss eine ausreichende Abdeckung des Messbereiches gewährleisten.
- (2) Die Scans sind in einem möglichst gleich bleibenden Abstand aufzunehmen, um eine konstante Punktdichte im späteren Gesamtmodell zu gewährleisten.
- (3) Wenn möglich sollten die Scans aus verschiedenen Höhenlagen aufgezeichnet werden, um Abschattungseffekte zu minimieren.



Abbildung 4.15: Warnzeichen W 10: „Warnung vor Laserstrahl“.

Nach der Datenerfassung müssen die Scandateien, wenn als Speicherort der Scanner gewählt wurde, auf einen externen PC via Ethernetanschluss oder W-Lan exportiert werden, um mit der weiteren Bearbeitung der Daten beginnen zu können. Die aufgezeichneten Daten bestehen aus x, y, z Koordinaten, die direkt in ein Kartesisches Koordinatensystem transformiert wurden und einem zugehörigen Reflektivitätswert. Beim FARO Photon 80 wird der Reflektivitätswert zwischen 0 und 1 normiert. Die Roh-Reflektivitätsdaten wurden mit 11-bit aufgenommen und können Werte von 0 bis 2047 umfassen (FARO, 2008).

4.7.2 Datenaufbereitung

Die Aufbereitung der Rohdaten erfolgt in dieser Studie, abhängig vom angestrebten Verwendungszweck, nach dem in Abbildung 4.16 dargestellten Arbeitsschema. Dabei wird unterschieden, ob die Daten und die daraus resultierenden Modelle zu Präsentationszwecken oder für die wissenschaftliche Auswertung genutzt werden sollten. Für Anwendungen bei denen Farbinformationen benötigt werden und Präsentationszwecke, werden die Daten

zunächst mit der Software FARO SCENE 4.5, 4.6 bzw. 4.7 (FARO, 2008; 2009; 2010) bearbeitet. Zunächst werden die Daten auf Grundlage der vorliegenden Farbfotos eingefärbt. Durch die Einfärbung der Punktwolke erfolgt eine Reduktion der Punktwolke auf die Auflösung der Kamera. Nach Anwendung eines Streufilters und eines Entfernungsfilters werden die Daten in das Programm JRC 3D Reconstructor 2 (Sequeira et al., 1999; Sgrenzaroli und Wolfart, 2002) exportiert und dort weiterverarbeitet.

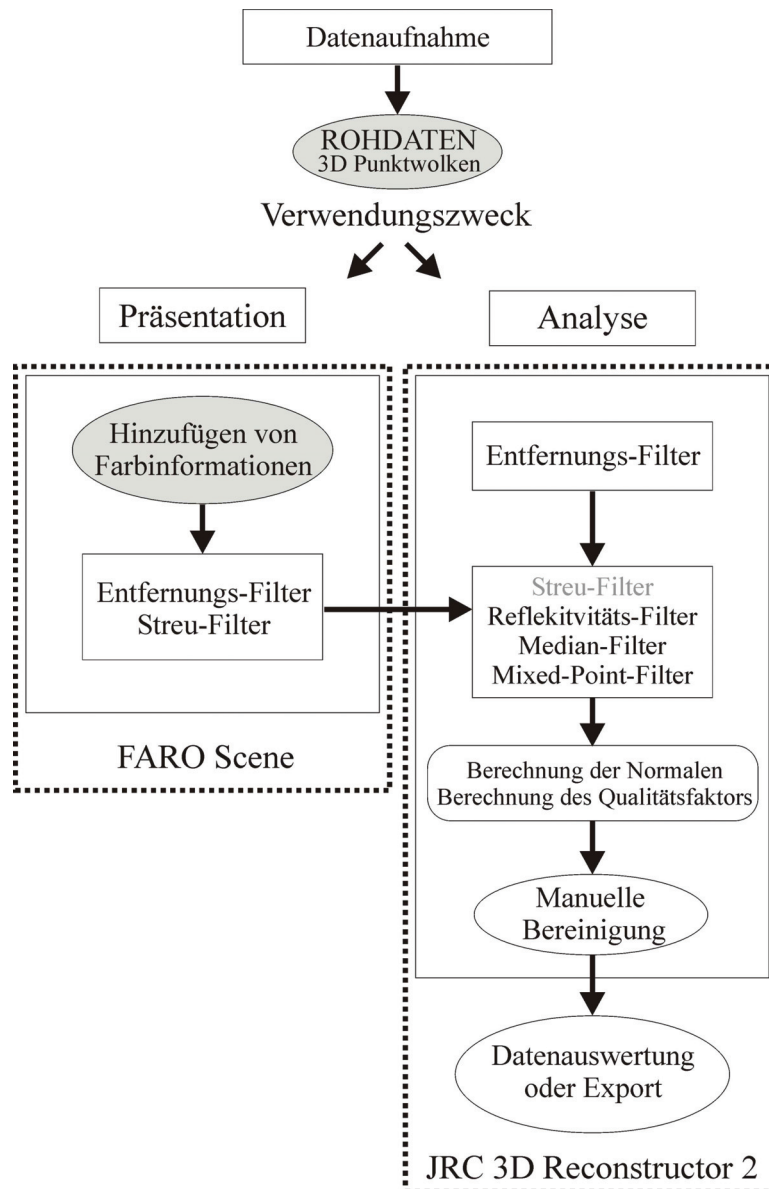


Abbildung 4.16: Arbeitsschema für die Verarbeitung von 3D-Punktwolken.

Der im Programm FARO SCENE verwendeten Streufilter dient der Entfernung von vereinzelten und ungenauen Punkten. Diese Punkte können entstehen, wenn der Laserstrahl z.B. zwei hintereinander liegende Objekte gleichzeitig oder gar kein Objekt innerhalb des Messbereiches trifft (Bei Freiluftmessungen, Punkte im offenen Himmel). Der Streufilter nutzt eine Bereichsmaske in der ein Scanpunkt mit den benachbarten Punkten verglichen wird. Wird hierbei ein Abstandsgrenzwert nicht überschritten und findet sich innerhalb der Bereichsmaske eine Mindestanzahl von weiteren Punkten, die über einen prozentualen Belegungsgrenzwert definiert wird, verbleibt der Punkt in den Daten. Werden diese Werte nicht erreicht wird der Punkt entfernt. Für die in dieser Arbeit verwendeten Daten wurde eine

Bereichsmaske von 3 x 3 Punkten um den prozessierten Punkt, ein Abstandsgrenzwert von 2 cm und ein Belegungsgrenzwert von 50 % gewählt.

Der angewendete Distanzfilter definiert über einen Minimal- und einen Maximalwert einen Entfernungsbereich, außerhalb dessen die Punkte entfernt werden. Daten die der weiteren wissenschaftlichen Auswertung dienen, werden, um die Auflösung zu erhalten nicht eingefärbt und direkt in das Programm JRC 3D Reconstructor importiert. Dort werden zunächst ein Entfernungsfiler und ein Streufilter angewendet, die nach dem gleichen Prinzip wie im Programm FARO SCENE arbeiten und für die die oben genannten Parameter gewählt wurden (Abb. 4.17).

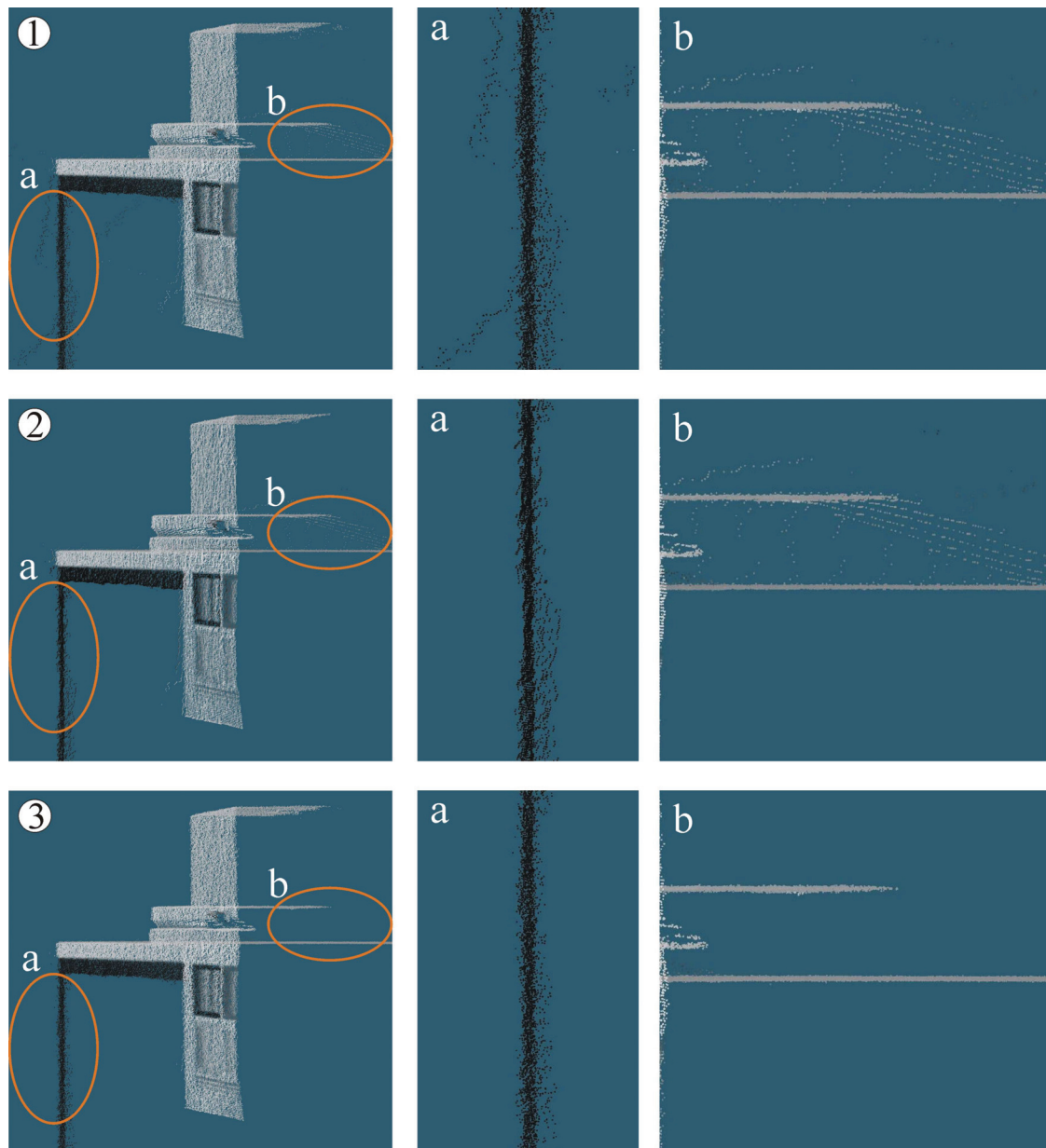


Abbildung 4.17: Rohdaten (1) und Daten nach der Anwendung des Streufilters (2) und des Mixed-Point-Filters (3). Abb. 2 zeigt die Wirkung des Streufilters auf vereinzelte Punkte in der Punktwolke (2a). Kanteneffekte werden nicht herausgefiltert. Abb. 3 zeigt die Wirkung des Mixed-Point Filters auf fehlerhafte Punkte entlang von Kanten (3a und 3b). Das gescannte Objekt ist eine Testanordnung zur Überprüfung der Auswirkungen der verschiedenen Auflösungseinstellungen. Die Ergebnisse der Testmessungen können dem Anhang entnommen werden.

Die weitere Datenverarbeitung unterscheidet nicht mehr zwischen eingefärbten und hochauflösenden Daten. Auf die Daten wird nun eine Reihe weiterer Filter angewendet und zusätzliche Parameter werden berechnet.

Ein Reflektivitätsfilter entfernt Punkte die außerhalb eines vordefinierten Reflektivitätsfensters liegen, d.h. Punkte die sehr hohe oder sehr niedrige Reflektivitätswerte haben, werden entfernt. Die Daten aus der Archäologischen Zone Köln zeigten kaum Werte die im absoluten Extrembereich lagen, da in den archäologischen Grabungen weder Materialien mit extrem hoher noch mit extrem niedriger Reflektivität zu finden waren. Die Werte wurden daher so gewählt, dass nur Reflektivitätswerte entfernt wurden die in den oberen und unteren 0.5 % des Gesamtbereiches lagen. Niedrige Reflektivitätswerte, die z.B. aufgrund schlechter Auftreffwinkel des Laserstrahls entstanden sind, wurden im weiteren Verlauf durch den später beschriebenen Mixed-Point-Filter entfernt.

Ein Median Filter glättet die Punktwolke und entfernt lokales Rauschen. Dazu wird in einer Bereichsmaske (hier 3 x 3 Punkte) der Entfernungswert gemittelt und dem prozessierten Punkt zugewiesen.

Der letzte angewendete Filter ist der bereits erwähnte Mixed-Point Filter. Dieser Filter entfernt fehlerhafte Punkte entlang der jeweiligen Richtung des ausgesendeten Laserstrahls. Der Filter betrifft Punkte an Kanten, Punkte die aus einem sehr steilen Winkel aufgezeichnet wurden sowie Punkte die aufgrund des Mehrdeutigkeitsproblems der Phasendifferenzmethode falsch lokalisiert wurden (Abb. 4.17). Hierbei wird der Laserstrahl als Vektor zwischen dem Scanner und dem aufgezeichneten Punkt definiert (Laser-Vektor). Ein zweiter Vektor wird zwischen dem aufgezeichneten Punkt und den benachbarten Punkten innerhalb einer Bereichsmaske (hier 3 x 3 Punkte) konstruiert (Punkt-Vektor). Nun wird ein minimaler Winkel zwischen Laser-Vektor und Punkt-Vektor definiert. Wird dieser Winkel unterschritten, wird der Punkt entfernt. Für die in dieser Arbeit verwendeten Daten wurde ein minimaler Winkel von 5° gewählt. Die Filterung der Daten erhöht die Qualität ("Schärfe") der Punktwolke. Im Anschluss werden zusätzliche Parameter auf Grundlage der Raumlage und Geometrie der aufgezeichneten Punkte berechnet.

Diese Parameter werden für weitere Schritte z.B. Gitternetzberechnungen im Verlauf der Datenaufbereitung und Auswertung benötigt. Zunächst wird für jeden Punkt die lokale Tangentialebene auf Grundlage der benachbarten Punkte einer Bereichsmaske (hier 3 x 3 Punkte) und daraus die zugehörige Oberflächennormale bestimmt.

Über die Kanten-Detektions-Routine werden geometrisch signifikante Linien in der Punktwolke gesucht. Diese Objekte werden über Tiefendiskontinuitäten und Orientierungsdiskontinuitäten identifiziert (Abb. 4.18).

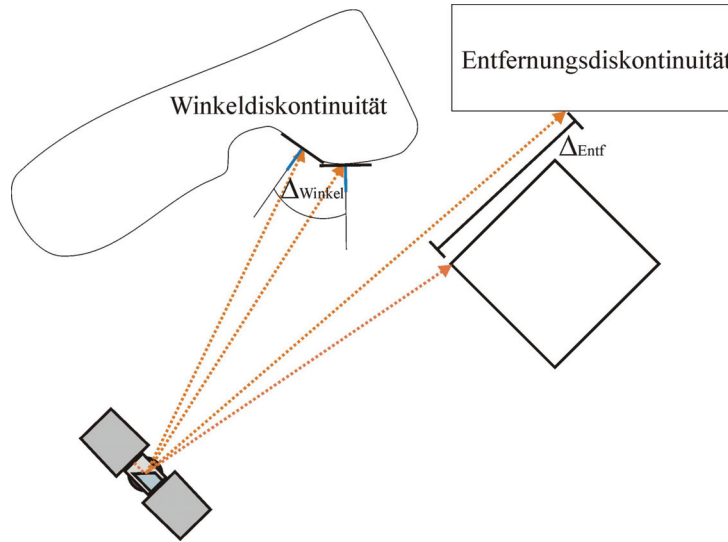


Abbildung 4.18: Verschiedene Methoden der Kantendetektion (verändert nach Gexcel, 2009).

Die Tiefendiskontinuität wird über eine Bereichsmaske von 3 x 3 Punkten ermittelt. Überschreitet die Differenz zwischen der Position eines Punktes und der Position seines Nachbarpunktes einen definierten Grenzwert (hier 0.1 m), wird die Kante extrahiert. Die Orientierungsdiskontinuität wird über die Differenz der Oberflächennormalen eines Punktes zu den Oberflächennormalen seiner Nachbarpunkte in der Bereichsmaske bestimmt. Überschreitet die Differenz der Normalen den definierten Winkel (hier 40°) wird die Kante extrahiert. Die Tiefendiskontinuitäts-Routine eignet sich zur Erfassung von scharfen Kanten, während die Orientierungsdiskontinuitäts-Routine zur Erfassung von abgerundeten Kanten genutzt wird.

Um die Qualität der aufgenommenen Punktwolke zu evaluieren, wird ein Qualitätsfaktor ("Confidence-Value") berechnet. Die Genauigkeit der Messung ist, neben gerätespezifischen Parametern von (1) dem Einfallswinkel des Laserstrahls auf das Zielobjekt, (2) der Entfernung vom Zielobjekt und (3) dem Material des Zielobjektes abhängig. Diese Faktoren können die Intensität des reflektierten Signals beeinflussen. Um die Qualität oder Vertrauenswürdigkeit eines Datenpunktes einschätzen zu können, wird der Qualitätsfaktor q als gewichtete Summe des Entfernungswertes I_{Entf} , des Reflektivitätswertes I_{Refl} und des Inklinationswertes I_{Inkl} für jeden Messpunkt p berechnet.

$$q(p) = \frac{W_{Entf} * I_{Entf}(p) + W_{Refl} * I_{Refl}(p) + W_{Inkl} * I_{Inkl}(p)}{W_{Entf} + W_{Refl} + W_{Inkl}} \quad (4.21)$$

W_{Entf} , W_{Refl} und W_{Inkl} sind hierbei die Wichtungen für den Entfernungs-, Reflektivitäts- bzw. den Inklinationswert.

Der Entfernungswert jedes Punktes $s(p)$ wird zwischen einem vordefinierten Minimal- s_{Min} und Maximalwert s_{Max} normiert.

$$I_{range}(p) = 1 - \frac{s(p) - s_{Min}}{s_{Max} - s_{Min}} \quad (4.22)$$

dabei gilt:

$$s_{Min} \leq s(p) \leq s_{Max}$$

Der Reflektivitätswert entspricht den Roh-Reflektivitätsdaten und wird zwischen 0 und 1 normiert. Der Inklinationwert basiert auf dem normierten Skalarprodukt zwischen der Oberflächennormalen N jedes Messpunktes p und der direkten Sichtlinie des Laserstrahls (Pers. Kommun., M.Fiocco (Gexcel), 2010).

$$I_{Inkl}(p) = \left| \frac{N(p) \cdot p}{|p|} \right| \quad (4.23)$$

Neben der Möglichkeit zur Wichtung der einzelnen Parameter, können zusätzlich einzelne Scans höher oder niedriger gewichtet werden, wenn mehrere Punktwolken gleichzeitig prozessiert werden. Ein zweiter Qualitätsfaktor wird auf Grundlage der gerätespezifischen Winkelgenauigkeit in horizontaler und vertikaler Richtung sowie der Entfernungsgenauigkeit des Gerätes berechnet. Auf diese Weise wird der genutzte Gerätetyp in die Qualitätsabschätzung einbezogen.

Nach Anwendung der genannten semi-automatischen Werkzeuge, werden die Daten manuell bearbeitet. Hierbei werden unerwünschte Bereiche der Punktwolke (z.B. moderne Konstruktionen in archäologischen Grabungen) entfernt. Zudem besteht die Möglichkeit fehlerhafte Punkte, die nicht von den automatischen Filtern erfasst wurden, zu entfernen. Mit diesem Schritt ist die Vorbereitung der Daten für die Verknüpfung der einzelnen Punktwolken und die Erstellung eines Gesamtmodelles abgeschlossen.

Da bei der Nutzung eines Lasermesssystems enorme Datenmengen entstehen, ist eine ausreichende Rechenkapazität notwendig. Die Datenauswertung im Rahmen dieser Arbeit wurde auf einer DELL T7400 64 bit Workstation mit 3.00 GHz Intel Xeon Prozessor, 64 GB Arbeitsspeicher und einer Festplattenkapazität von 1.6 TB durchgeführt.

4.7.3 Datenbearbeitung

Erster Schritt nach der Aufbereitung der Daten, ist die Registrierung der Einzelscans und die Erstellung eines Gesamtmodelles. Die enormen Datenmengen, die durch die Verarbeitung der Rohdaten entstehen (0.5-3 GB/Punktwolke), erforderte die Aufteilung in Teilbereiche des Arbeitsgebietes für die Datenbearbeitung. Kleinere Bereiche wurden nach Konstruktionen oder Gebäuden gruppiert (z.B. Kloake, Mikwe, Brunnen etc.) und in einzelnen Projektdateien gespeichert. Größere Gebäude wie das Praetorium wurden in Untermodelle gegliedert (z.B. Octogon, Porticus etc.). Um dennoch ein Modell des gesamten Arbeitsbereiches darstellen zu können, wurden von den Teilbereichen niedriger auflösende Modelle erzeugt, die in einer zusätzlichen Projektdatei zusammengefasst werden konnten.

Die Registrierung der Daten ist die Transformation mehrerer Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem (Barber et al., 2003). Lerma et al. (2008) unterscheiden hierbei die direkte und die indirekte Registrierung.

Bei der direkten Registrierung muss die Position der Scannerstandorte bzw. ihre Lage zueinander bekannt sein. Dazu müssen während der Messung existierende Bezugspunkte für die Scannerstandpunkte genutzt werden oder es muss ein neues Bezugssystem erstellt werden, in dem die Scannerstandpunkte detailliert erfasst sind. Bei dieser Art der Registrierung kann jeder Punktwolke ihr zuvor im Gelände aufgenommener Nullpunkt im jeweiligen Bezugs-

system zugewiesen werden. Eine Georeferenzierung in ein globales Koordinatensystem ist hierbei möglich, wenn die Bezugspunkte (Scannerstandpunkte) im Gelände eingemessen wurden und ein Bezug zu einem globalen System besteht.

Die indirekte Registrierung nutzt gemeinsame Punkte in den Punktwolken. Hierbei ist eine ausreichende Überlappung der aufgenommenen Punktwolken notwendig. Lerma et al. (2008) unterscheiden bei der indirekten Registrierung die Registrierung mittels Zielmarken und die Punktwolke-Punktwolke Registrierung. Bei der Registrierung über Zielmarken werden vor der Messung im Arbeitsbereich mehrere Zielmarken angebracht, von denen mindestens drei in allen aufgenommenen Scans sichtbar sein müssen. Diese Zielmarken werden in den einzelnen Punktwolken markiert, wodurch die Transformation in ein gemeinsames Koordinatensystem möglich ist. Die Punktwolke-Punktwolke Registrierung kann ebenfalls Zielmarken oder signifikante Punkte nutzen. Hierbei wird ausgehend von einer Referenzpunktwolke immer eine Punktwolke mit einer zweiten, die einen ausreichend großen Überlappungsbereich besitzt, verknüpft. Bei der indirekten Registrierung ist eine Georeferenzierung in ein globales Bezugssystem möglich, wenn innerhalb der verknüpften Punktwolke mindestens drei Vermessungspunkte liegen, über die ein Bezug zum globalen System besteht.

In der vorliegenden Studie wurde zur Registrierung eine Kombination aus den drei vorgestellten Registrierungsarten verwendet. In den einzelnen Teilbereichen des Arbeitsgebietes wurde die zielmarkenbasierte und die punktwolkenbasierte, indirekte Registrierung genutzt. Im Vorfeld der Messungen wurden bekannte Vermessungspunkte mit Vermessungsspiegeln markiert. In Bereichen in denen eine ausreichende Überlappung der Scans nicht sichergestellt werden konnte oder große Distanzen zwischen den Scans lagen, wurden zudem Zielmarken und/oder Registrierungskugeln angebracht. Die aufgenommenen Scans in den einzelnen Teilbereichen wurden zunächst über signifikante Punkte oder falls vorhanden die Zielmarken manuell grob registriert. Hierzu wurde ein Scan ausgewählt, dessen Koordinatensystem als Referenzsystem fungierte, in das alle anderen Scans überführt wurden. Dazu wurden im Referenzscan und einem weiteren Scan mit ausreichender Überlappung bzw. im weiteren Verlauf in einem bereits überführten Scan und einem weiteren Scan mit ausreichender Überlappung jeweils mindestens drei gemeinsame Punkte markiert. Über diese Punkte wird eine möglichst hohe Übereinstimmung berechnet. In den meisten Fällen konnte hierbei schon ein mittlerer Registrierungsfehler von unter einem Zentimeter erreicht werden, wobei nach Angaben des Softwareherstellers (Gexcel, 2009) ein Registrierungsfehler von <0.5 m tolerierbar ist. In einem weiteren Schritt wird die Feinregistrierung der betroffenen Scans durchgeführt. Dazu wird über einen ICP-Algorithmus ("Iterative-Closest-Point", Besl und McKay, 1992) iterativ der Minimalabstand beider Punktwolken ermittelt. Je nach Ergebnis der Berechnungen wurden die Parametereinstellungen angepasst und die Berechnung wiederholt (Tab. 4.5).

Die mittleren Registrierungsfehler für die einzelnen Punktwolken in den Teilbereichen können den Tabellen im Anhang entnommen werden. Als akzeptabel wurde aufgrund der angestrebten Auflösung ein Wert von <0.005 m angenommen, der in allen Teilbereichen erreicht wurde. Als ideal wurde ein Wert <0.002 m angenommen, der jedoch in einigen Teilbereichen nicht erreicht werden konnte.

Tabelle 4.5: Wichtige Registrierungsparameter der Software JRC 3D Reconstructor 2 und die Vorgehensweise bei nicht zufrieden stellender Registrierung.

| Parameter | Grundeinstellungen | Einstellung bei schlechtem Ergebnis | Einstellung bei Abbruch aufgrund zu geringer Punktzahl |
|------------------------------|--------------------|-------------------------------------|--|
| nmin Iterationen | 10 | | |
| nmax Iterationen | 100 | | |
| Min. Suchdistanz (m) | 0.1 | | |
| Max. Suchdistanz (m) | 0.8 | + | + |
| Max. Normalendivergenz (°) | 45 | | + |
| Angestrebter MRF (m) | 0.001 | | |
| n Kontrollpunkte | 5000 | + | |
| nmin Kontrollpunkte | 1000 | | |
| n ausreichend Kontrollpunkte | 3000 | + | - |

Nach der Verknüpfung der Einzelscans eines Teilbereiches, wurde mittels der markierten Vermessungspunkte die Georeferenzierung durchgeführt. Bei der Referenzierung entstand ein mittlerer Fehler von ≤ 0.005 m. Über die Georeferenzierung wurde der Nullpunkt der Referenzscans des jeweiligen Teilbereiches in Bezug zum globalen System gesetzt. Dadurch konnten in einem zusätzlichen Projekt alle Teilbereiche über das globale System zusammengeführt werden. Für die detaillierte Auswertung der Daten wurde jedoch mit den Teilbereichsmodellen gearbeitet, da diese eine höhere Auflösung haben. Die Auswertung der Daten erfolgte im Anschluss an die Registrierung der Punktwolken. Die Georeferenzierung war dafür nicht zwingend notwendig und wurde bei einigen Teilbereichsmodellen nachträglich durchgeführt, da Referenzpunkte zum globalen System teilweise erst zu späteren Zeitpunkten zur Verfügung standen.

4.8 Datenauswertung und Schadensanalyse

Das Hauptziel der Datenauswertung für diese Arbeit lag in der Analyse von strukturellen Bauwerksschäden, die an Gebäuden im Bereich der Archäologischen Zone zu finden sind. Für die gewonnenen 3D-Daten wurde daher ein fünfstufiges Schema erstellt, nachdem die Daten ausgewertet wurden (Abb. 4.19).

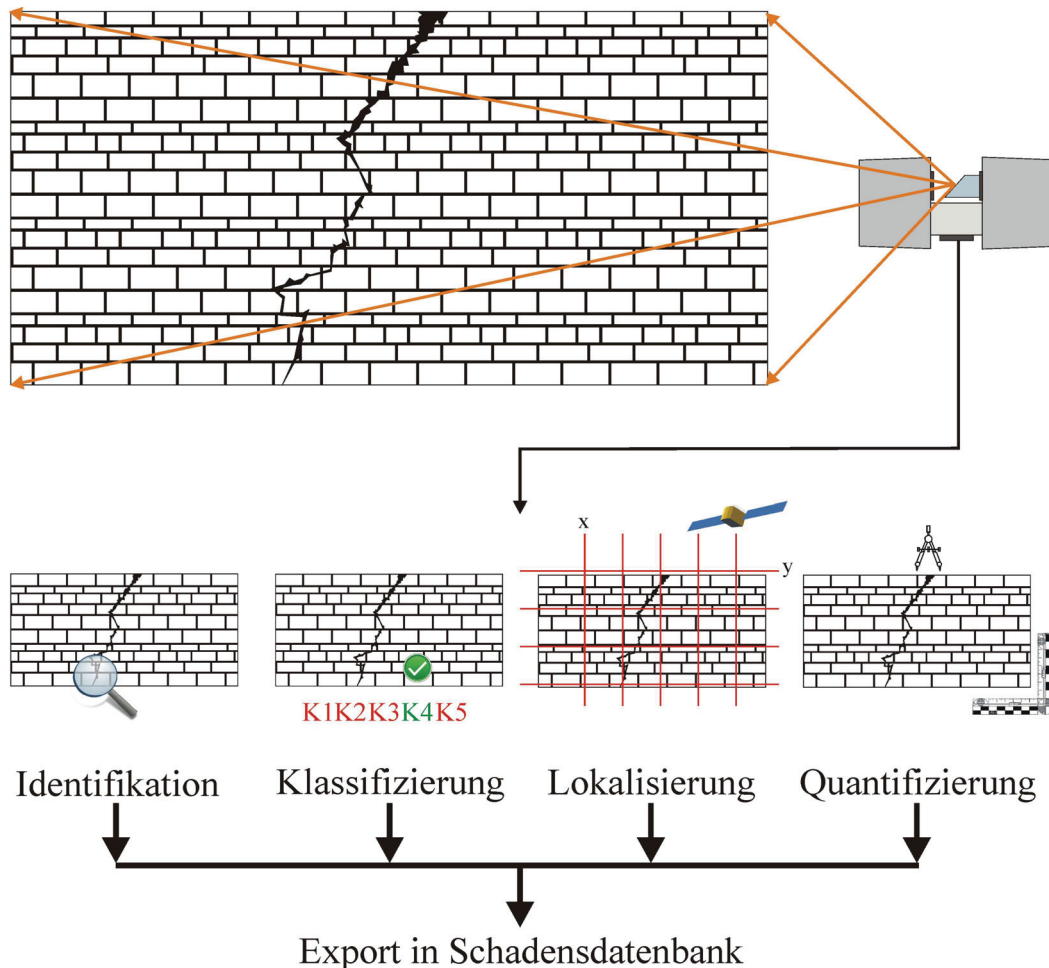


Abbildung 4.19: Vorgehensweise bei der Auswertung von Schäden.

In einem ersten Schritt wurden Schäden anhand der 3D-Daten identifiziert. Dazu wurden die Modelle der Teilbereiche auf Grundlage der Einordnung und Benennung der archäologischen Ausgrabungen in einzelne Baugruppen (z.B. Mauern, Pfeiler, Räume) unterteilt. Diese Einzelbauteile wurden sukzessive überprüft und Schadensbereiche identifiziert.

Alle Schäden wurden kartiert, im globalen Referenzsystem (WGS 84, Gauss-Krüger-Zone 2) lokalisiert und in ein fünfklassiges System eingeteilt. Die Schäden wurden in Rotationen ("Rotation", Abb. 4.20, 1), Neigungsschäden ("Tilting", Abb. 4.20, 2), Versatzschäden ("Displacement", Abb. 4.20, 3) und Bruchschäden ("Cracking", Abb. 4.20, 4) eingeteilt. Eine fünfte Schadensklasse umfasst alle anthropogenen Schäden unabhängig ihrer Art ("Recent Alteration", Abb. 4.20, 5), die durch sekundäre anthropogene Einwirkung entstanden sind (z.B. Schäden durch den 2. Weltkrieg, Schäden durch Ausgrabungstätigkeit oder Bautätigkeit). Im nächsten Schritt wurden die Schäden mit unterschiedlichen Methoden, die im Abschnitt Schadensanalyse erläutert werden, quantifiziert. Im Anschluss an die

Datenauswertungen sind alle Ergebnisse in einer Excel Datenbank mit mehreren verknüpften Ebenen zusammengefasst worden (siehe Anhang).

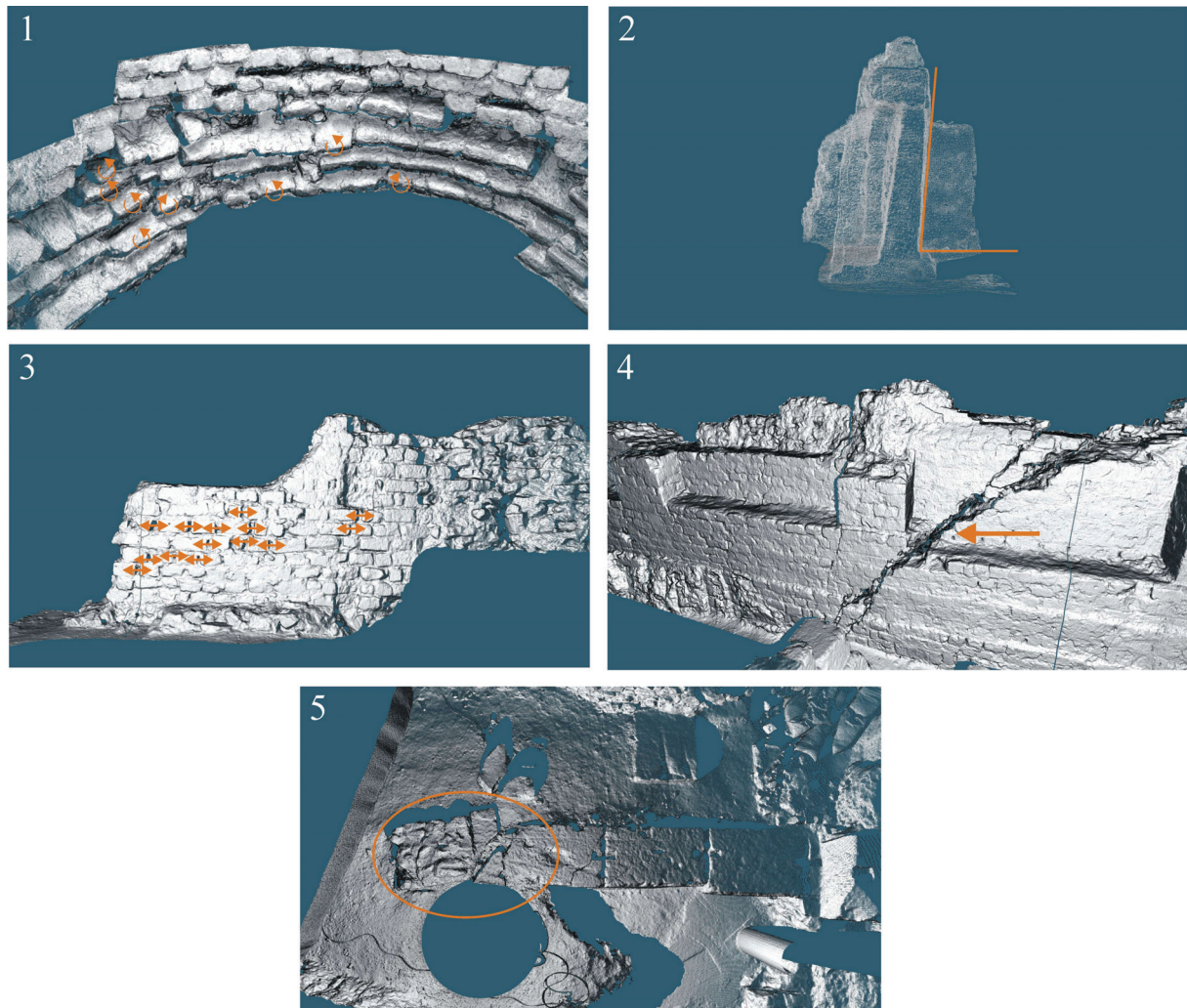


Abbildung 4.20: Schadensklassifizierungen: (1) Rotationsschaden, (2) Neigungsschaden, (3) Horizontaler Versatz, (4) Bruch- oder Risschaden, (5) anthropogen verursachter Rotationsschaden (Baggerarbeiten).

SCHADENSANALYSE

Die verwendete Software JRC 3D Reconstructor 2, stellt dem Anwender eine Vielzahl an Werkzeugen für die quantitative Auswertung der 3D-Punktwolken, zur Verfügung. Zu den Basiswerkzeugen, die bei der Datenauswertung verwendet werden, gehören die Messwerkzeuge. Diese Werkzeuge ermöglichen die Messung von Distanzen und Winkeln sowie von Flächen und Volumina, direkt an der Punktwolke oder an aus der Punktwolke berechneten Gitternetzmodellen. Diese Werkzeuge werden eingesetzt, wenn schnelle Antworten auf Fragestellungen erforderlich sind. Bei der Schadensanalyse wurden nur die Schäden der Bruchschadensklasse (Abb.4.21) und Teile der Versatzschadensklasse (horizontaler Versätze innerhalb von Mauern) direkt an der Punktwolke vermessen. Bei diesen Klassen konnte der Vorteil genutzt werden, dass mit den bereitgestellten Werkzeugen in kurzer Zeit viele genaue Messungen durchgeführt werden konnten.

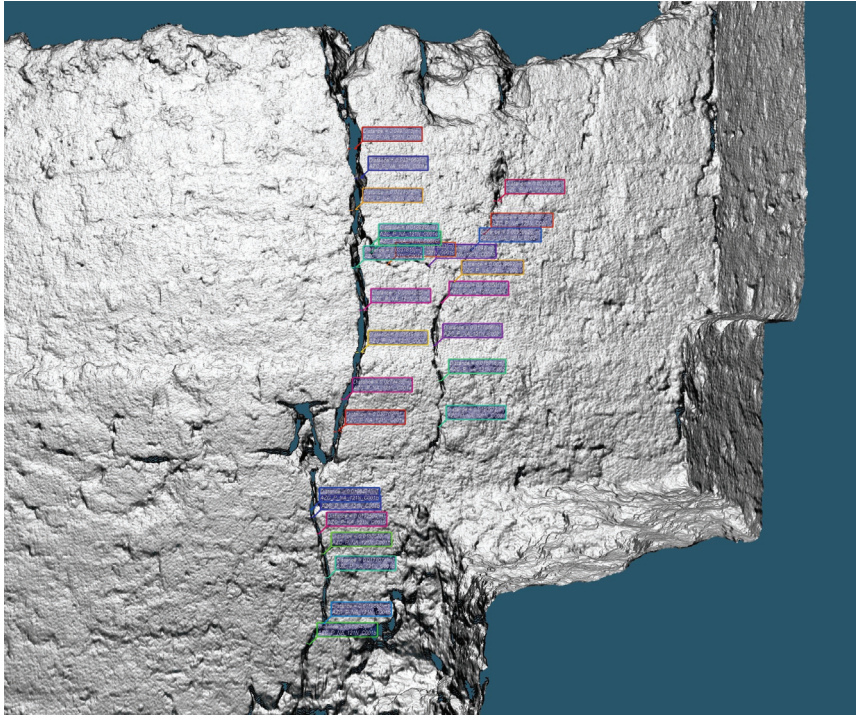


Abbildung 4.21: Messung eines Risses in der 3D-Punktwolke (Beispiel aus dem Praetorium). Die Markierungen zeigen die Lage der Einzelmessungen.

Bei den Neigungs-, Rotations- und Teilen der Versatzschäden (vertikale Versätze) wurden indirekte Verfahren angewendet, bei denen zwar Parameter aus der Punktwolke oder Teile der Punktwolke, genutzt wurden, deren Berechnung oder Bemaßung jedoch außerhalb der 3D-Software in externen Programmen vorgenommen wurde.

Für die Auswertung und Quantifizierung der Neigungsschäden, von denen komplette Mauern oder Gebäudeteile betroffen sind, wurden orientierte 2D-Schnitte ("Cross-sections") durch das Modell erzeugt. Diese linearen Elemente wurden wieder in Punktwolken umgewandelt und als x,y,z-Textdateien exportiert. Die Daten der Schnitte wurden in externen Programmen (Golden Software Grapher, Corel Draw) dargestellt und die Neigungen an verschiedenen Stellen bestimmt (Abb. 4.22).

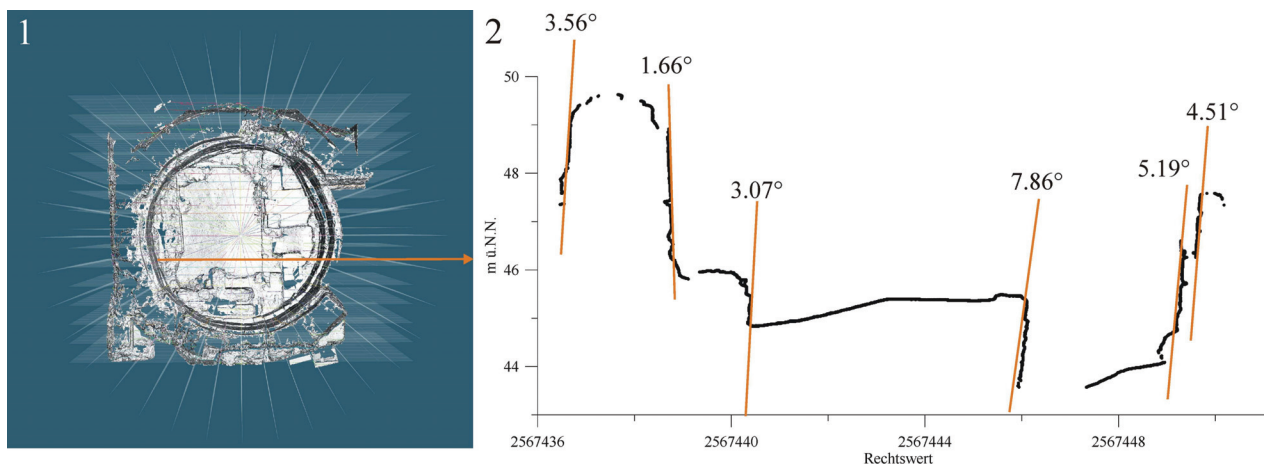


Abbildung 4.22: Virtuelle Schnitte durch die 3D-Punktwolke des Octogons im Praetorium (1) und ein Beispiel der Auswertung eines Schnittes (2). Hierbei wurden Geraden (orange) an verschiedene Stellen der Schnitte angepasst und über diese die Neigung in ° bestimmt. Der Pfeil in (1) zeigt die Lage des Schnittes innerhalb des Octogons.

Insgesamt wurden auf diese Weise zur Quantifizierung von Neigungsschäden über 160 Schnitte durch die verschiedenen Teilmodelle erzeugt. Virtuelle Schnitte durch die Punktwolke wurden ebenfalls bei der Auswertung von vertikalen Versätzen und Deformationen kompletter Konstruktionen eingesetzt (Schacht der Mikwe, Abwasserkanal). Bei der Auswertung der Schäden des ca. 115 m langen westlichen Teils des römischen Abwasserkanals (siehe Kapitel 5.2.2) musste eine Möglichkeit gefunden werden, neben den vertikalen Versätzen auch die Deformation der Gesamtstruktur zu quantifizieren. Hierzu wurden insgesamt 112 Schnitte erzeugt, die die Konstruktion rechtwinklig schneiden. An Teilen dieser Schnitte wurde anhand der Breite, der Höhe und der Spur des aufsitzenden Gewölbes die ursprüngliche, undeformierte Form des Kanals an dieser Stelle rekonstruiert. Für diese ideale Form sowie die deformierte Form wurde eine Flächenberechnung durchgeführt. Nun konnten die Anteile der tatsächlichen Form, die innerhalb bzw. außerhalb der idealen Form lagen, bestimmt werden (Abb. 4.23).

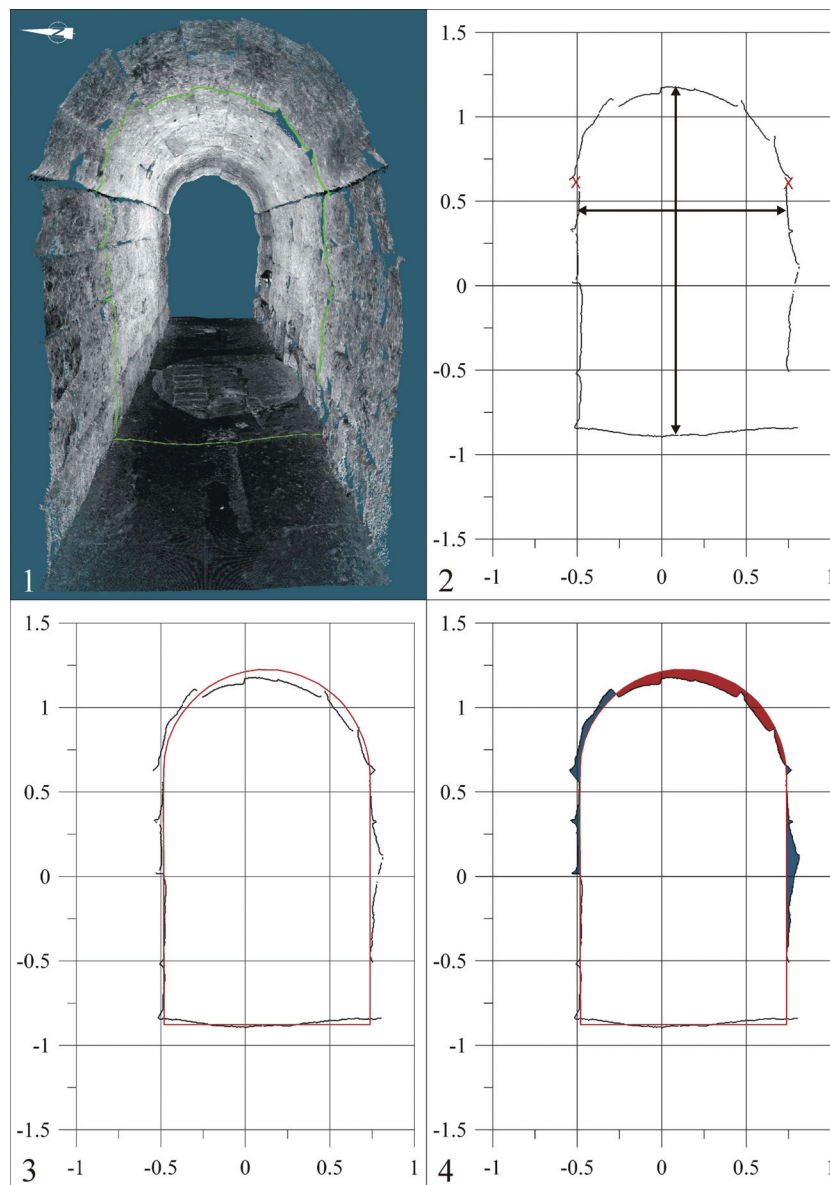


Abbildung 4.23: Deformationsanalyse des Abwasserkanals über virtuelle Schnitte durch die 3D-Punktwolke. (1) Erzeugung der Schnitte in der Punktwolke. (2) Export und Bemaßung des Schnittes. (3) Anhand der Messungen wird die ideale Form rekonstruiert (rote Linie). (4) Die Abweichungen zwischen idealer und tatsächlicher Form wird über Flächen, die innerhalb (rot) bzw. außerhalb (blau) der idealen Form liegen quantifiziert.

In einigen Bereichen des Arbeitsgebietes konnten Neigungsschäden nicht über Schnitte quantifiziert werden, da z.B. Mauern nur von einer Seite erfasst werden konnten oder sich die untersuchte Mauer entlang ihrer Längsachse neigte. In diesen Fällen wurden mit Hilfe der Software Orthophotos der Punktwolke erzeugt, anhand deren die Neigungen vermessen werden konnten (Abb. 4.24).

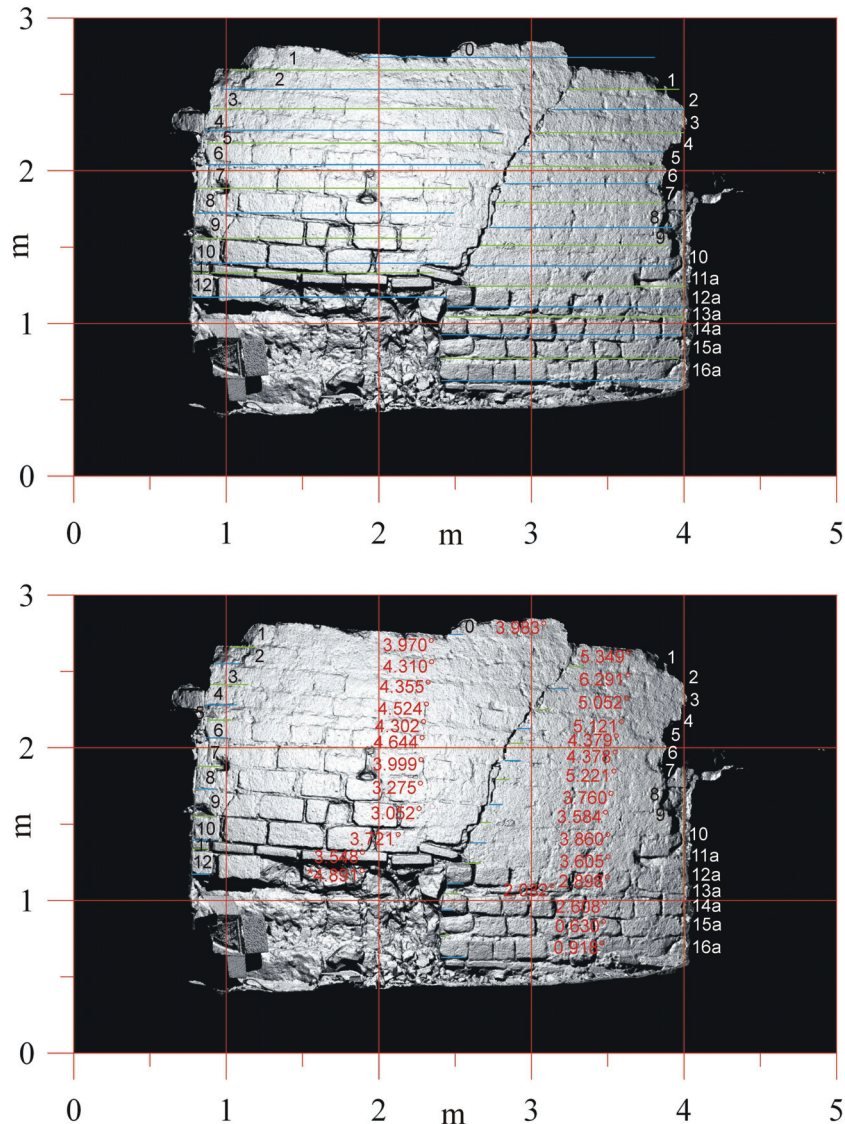


Abbildung 4.24: Auswertung der Neigungen an einer Mauer im Praetorium. Oben: Das ursprüngliche Gefüge der Mauer wird rekonstruiert (blaue und grüne Linien). Unten: Über die Neigungen der Fugenverläufe werden die Neigungen einzelner Blocklagen in verschiedenen Bereichen der Wand bestimmt.

Wie schon am Beispiel des Abwasserkanals deutlich wurde, bestand oftmals die Notwendigkeit, die Deformation kompletter Strukturen zu erfassen. Für diese Problemstellung wurden zwei Lösungsansätze gefunden. Zum einen kann die tatsächliche Form der Konstruktion in ihrer Gesamtheit betrachtet werden, zum anderen kann die Deformation über die Gesamtheit der Einzelschäden erfasst werden. Eine Kombination der beiden Methoden wurde bei der mittelalterlichen Kloake (Kap. 5.3.3), einer zylinderförmigen Konstruktion mit einer Tiefe von 8.3 m und einem Durchmesser von 2.3-2.5 m, angewendet. Die Kloake zeigte neben einer Deformation der Gesamtstruktur auch eine eindeutige Schadenszone in einem diskreten Tiefenbereich. Um die Deformation der gesamten Struktur zu erfassen, wurde

zunächst in der 3D Software ein Zylinder an die Punkte der oberen 6 m der Kloake angepasst. Dazu wurden sämtliche Punkte der Kloakenwand ausgewählt und über das Programm wurde mittels eines Algorithmus der kleinsten Fehlerquadrate ein Zylinder in die Punktauswahl gelegt. Dieser Zylinder, mit einem Durchmesser von 2.38 m, stellt die idealisierte undeformierte Form der Kloake dar (Abb. 4.25). In einem nächsten Schritt wurde eine Abstandsberechnung durchgeführt, die eine Abschätzung, der Abweichung der Kloakenform von der idealisierten Form, zulässt (siehe Kap. 5.3.3). Um bei der Berechnung nur positive Werte zu erhalten wurde der Zylinderradius verkleinert, so dass der Zylinder komplett innerhalb der Kloake lag (Abb. 4.25, 2).

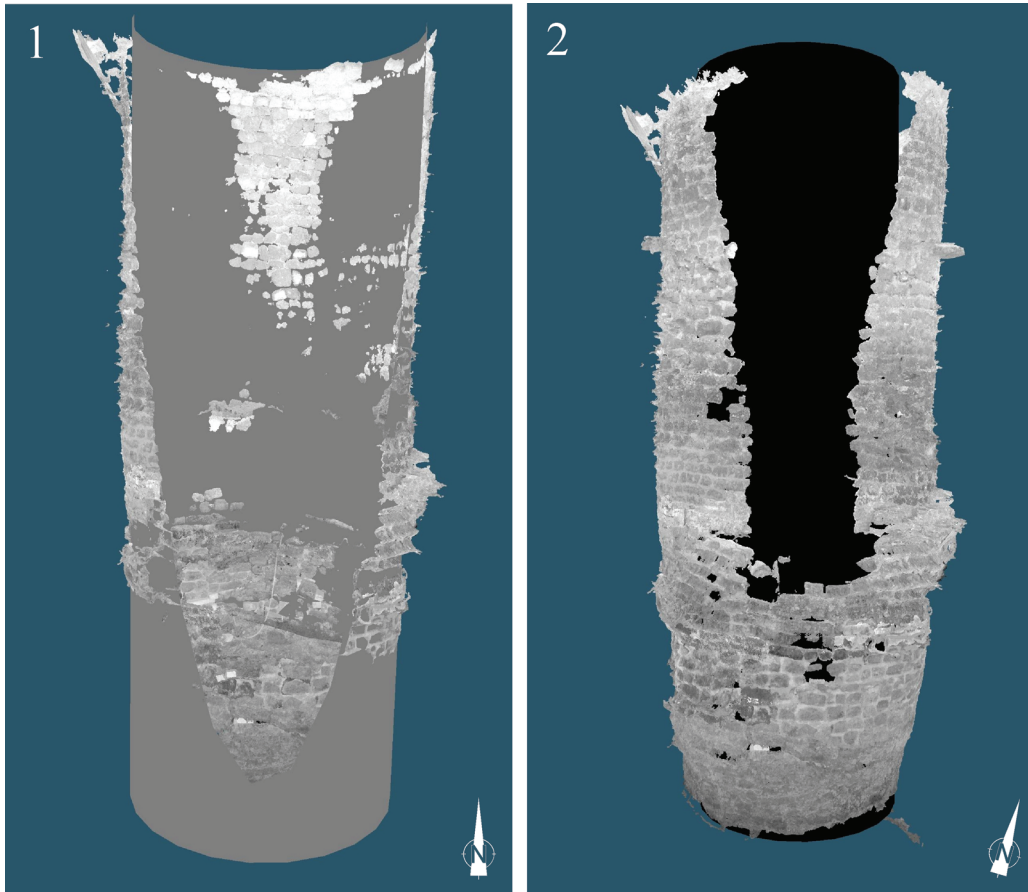


Abbildung 4.25: 3D-Punktwolke der Kloake mit dem auf Grundlage der Punkte berechneten idealen Zylinder (1). (2) zeigt den zur Abstandsberechnung genutzten Zylinder mit reduziertem Radius.

Die schon erwähnte Schadenszone wurde zusätzlich im Detail untersucht. Die Kloake ist aus 60-70 Lagen mittelgroßer Tuffhandquadern aufgebaut. In der Schadenszone sind diese Blöcke rotiert und versetzt. Um diese Raumlage zu bestimmen, wurden virtuelle Flächen auf die Stirnseiten der Blöcke angepasst (Abb. 4.26). Die Orientierung der Flächennormalen dieser Flächen, quantifiziert über den Vergleich zur ursprünglichen Lage, die über die Position auf dem Umfang der Kloake idealisiert rekonstruiert wurde, die Rotation und die Neigung des jeweiligen Blocks.

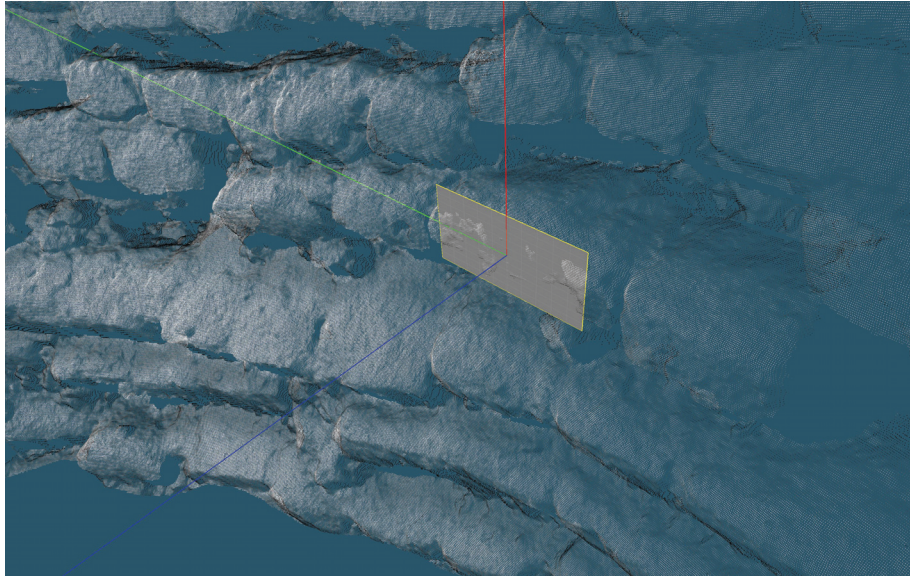


Abbildung 4.26: 3D-Punktwolke der Kloake mit ausgewählter Fläche als Beispiel. Die Fläche wurde an die Punkte der Frontseite des Blockes angepasst.

Die gleiche Methode der Flächenanpassung an einzelne Blöcke wurde bei der Auswertung der Schäden am römischen Brunnen angewendet (Kapitel 5.3.2). Die in dieser Arbeit verwendeten Methoden zur Auswertung der 3D-Daten zeigen, dass nicht nur die Durchführung einer Messkampagne mit einem Lasermessgerät einen ortsangepassten Ansatz erfordert, sondern auch die Auswertung der Daten.

5. Archäoseismologie in der Archäologischen Zone Köln

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Bereiche des Arbeitsgebietes der Archäologischen Zone vorgestellt. Neben der archäologischen Interpretation der Gebäude werden der Kartierungsprozess sowie die Auswertung der Schäden beschrieben.

5.1 Die Archäologische Zone Köln

Als Archäologische Zone Köln wird ein ca. 10.000 m² großes Areal in der Altstadt von Köln bezeichnet, in dem zurzeit archäologische Ausgrabungen von römischen und mittelalterlichen Befunden stattfinden. Ziel des Projektes ist es im Anschluss an die Grabungen einen Großteil des Areals als Museumskomplex zu erhalten. Der geplante Museumskomplex „Archäologische Zone/Jüdisches Museum“ soll auf 7500 m² Ausstellungsfläche 2000 Jahre der Kölner Stadtgeschichte präsentieren (Schütte und Gechter, 2011). Schwerpunkt werden hierbei das römische Verwaltungsviertel mit den Resten des Statthalterpalastes und seinen Vorgängerbauten sowie das mittelalterliche jüdische Viertel mit den Synagogenbauten, der Mikwe und den Wohn- und Kaufmannshäusern sein. Abbildung 5.1 zeigt einen Überblick über das derzeitige Grabungsareal und die, in vorangegangenen Grabungen bereits erschlossenen, Bereiche.

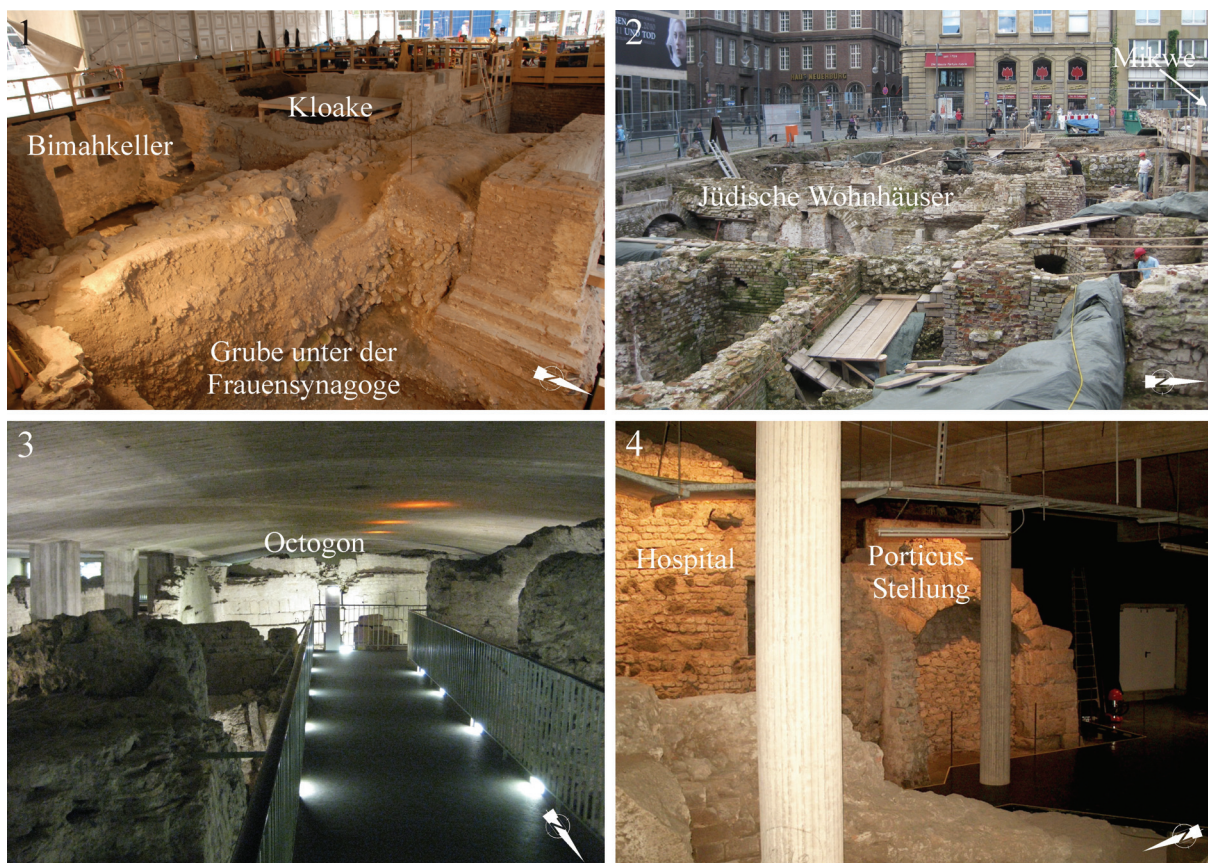


Abbildung 5.1: Übersicht des derzeitigen Grabungsareals der Archäologischen Zone und der bereits ergrabenen Bereiche. (1) Grabungszelt auf dem Rathausplatz, (2) Grabungsfeld Süd, (3) Museumskomplex Praetorium, (4) Porticus (Fotos: Erdbebenstation Bensberg).

Abbildung 5.2 zeigt einen Entwurf des geplanten Museumskomplexes mit den verschiedenen thematischen Bereichen.

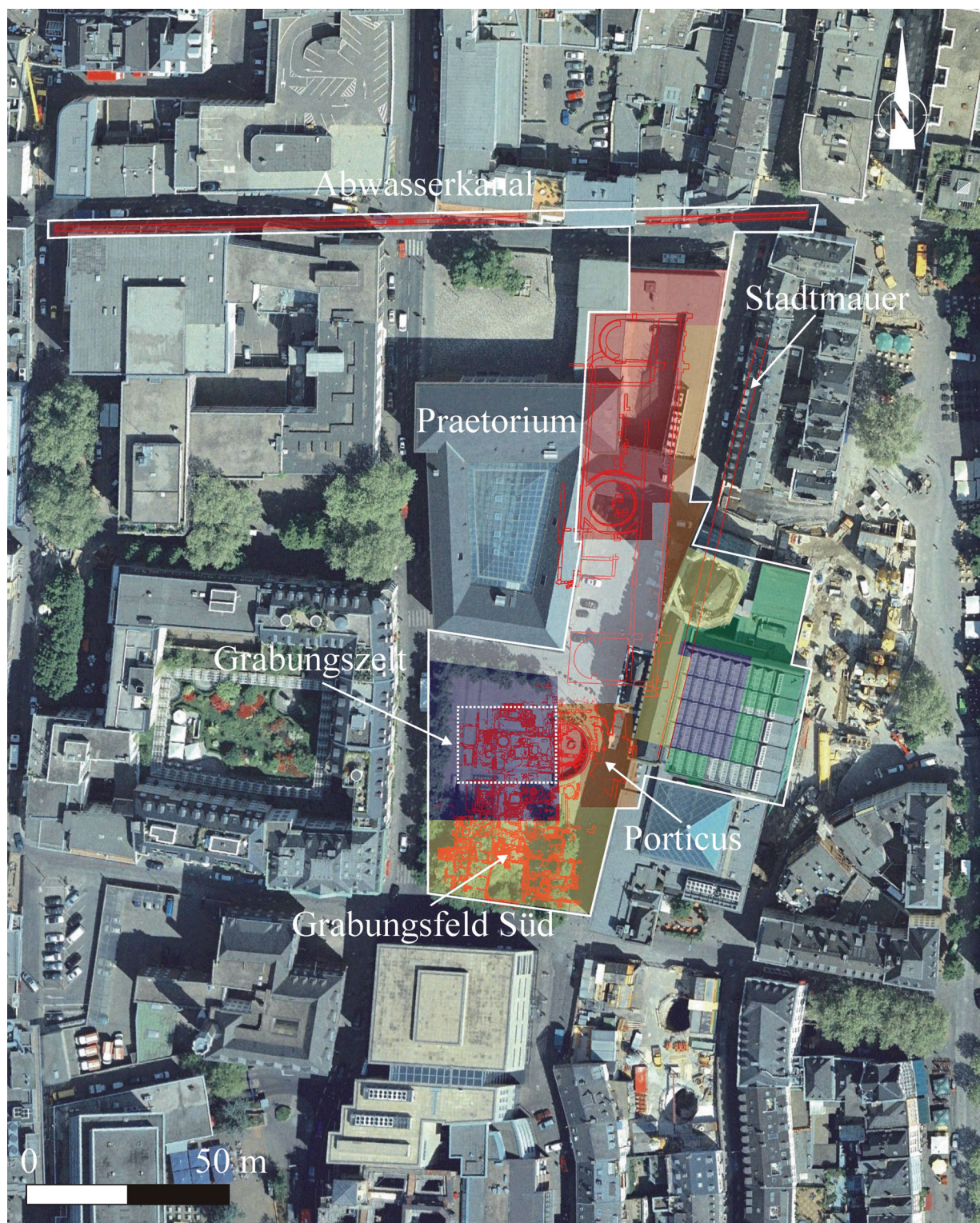


Abbildung 5.2: Übersicht des geplanten Museumskomplexes mit den thematischen Bereichen (blau: Ausstellungsflächen, rot: Das römische Köln, gelb: das mittelalterliche Köln, orange: römisch/mittelalterliche Mischbefunde, grün: Museumsinfrastruktur, weiß: bislang nicht ergraben). Die weiße Linie markiert die Grenze der Archäologischen Zone (nach Schütte und Gechter, 2011; Luftbild: Google Maps, 2010).

Die Archäologische Zone ist Teil des Strukturprogrammes „Regionale 2010“ des Landes Nordrhein-Westfalen und soll wichtiger Bestandteil der „Via Culturalis“ eines Projektes der Kölner Stadtentwicklung werden. Die „Via Culturalis“ soll mit dem Dom, dem Römisch-Germanischen Museum, dem Rathaus, dem Wallraf-Richartz Museum, Alt-St.Alban, dem Gürzenich, St. Maria im Kapitol, dem Ubiermonument und der Archäologischen Zone im zentralen Bereich, eine kulturelle Nord-Südachse durch Köln bilden.

Die derzeitigen Ausgrabungen finden im Bereich des Rathausplatzes statt und umfassen einen Bereich von dem schon seit dem 13. Jahrhundert bekannt ist, dass sich römische Substanz im Untergrund befindet. Bis zur zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden bei Neu- und Umbauten immer wieder römische Mauern freigelegt und teilweise Inschriften gefunden, die Hinweise auf die römische Administration gaben (Schütte und Gechter, 2011). Ende des 19. Jahrhunderts wurde die Topographie des Rathausplatzes verändert und es wurden in der Folge immer mehr Baureste aus römischer Zeit entdeckt, die 1895 erstmals von Schultze und Steuernagel beschrieben wurden. Fälschlicher Weise wurde jedoch ein fränkischen Ursprung der Gebäudereste angenommen. Erst nach den Zerstörungen im 2. Weltkrieg, die einen Neubau des „Spanischen Baus“, einem ehemaligen Teilbau des Rathauses, erforderten, konnte das Areal archäologisch ergraben werden (Doppelfeld, 1956). Teile dieses Grabungsareals wurden als unterirdischer Museumskomplex unter dem damals errichteten Verwaltungsbau des Rathauses erhalten. Ende der 1960er Jahre wurde eine weitere Grabungskampagne auf dem Rathausplatz durchgeführt (Precht, 1973).

Seit 2007 schließen die derzeitigen Grabungen an die früheren Arbeiten an und bilden eine durchgehende Verbindung vom Praetorium im Norden zum jüdischen Viertel auf dem südlichen Rathausplatz. Die Grabungen ermöglichen neben der archäologischen Erfassung die detaillierte Kartierung und Auswertung des archäologischen Inventars durch naturwissenschaftliche Methoden und bilden somit die Grundlage für diese Arbeit.

Der geplante Museumskomplex „Archäologischen Zone/Jüdisches Museum“ wird den zentralen Bereich der derzeitigen Grabung in einem Museumsbau einschließen, während alle weiteren archäologischen Befunde in einem unterirdischen Komplex erschlossen werden.

5.2 Das Praetorium und seine direkte Umgebung

Das Areal rund um den Praetoriumspalast bildet zusammen mit dem Rathausplatz im Süden seit der Koloniegründung den administrativen Bezirk der Stadt Köln. In seiner maximalen Ausdehnung erstreckte sich der administrative Bezirk, vom 1. bis zum 4. Jahrhundert von der heutigen „Kleinen Budengasse“ bis zur Hälfte der N-S verlaufenden „Judengasse“. Im Osten wurde der Bezirk von der unterhalb des Hanges zu Rhein gelegenen Stadtmauer begrenzt. Im Westen erstreckten sich die peripheren Gebäude des Praetoriums bis mindestens zu heutigen Strasse „Unter Goldschmied“. Die verschiedenen Bauphasen des Praetoriums zeigen, dass zu römischen Zeiten das Zentrum der administrativen Gewalt etwas nördlich der heutigen Administration, des Rathauses lag. Erst im Mittelalter, nach der Merowingerzeit verlagerte sich dies mit der Errichtung des historischen Rathauses weiter nach Süden und das jüdische Viertel wurde Teil des administrativen Bezirkes. Auch die Bereiche der Stadt die zu römischen Zeiten noch vor der Stadtmauer im Osten lagen, gewannen an Bedeutung (Gechter und Schütte, 2000). Die vorgenommene Zweiteilung des administrativen Bezirkes, dient in dieser Arbeit auch der klareren Abgrenzung der römischen Befunde um das Praetorium und den zeitlich deutlich schwieriger zu fassenden Befunden auf dem Rathausplatz, die von römischer Zeit bis in die Moderne hineinreichen. In den folgenden Abschnitten werden die Befunde des Praetoriums und seiner Peripheriegebäude vorgestellt.

5.2.1 Praetorium

EINLEITUNG

Das Praetorium in Köln war der Amts- und Wohnsitz des Statthalters der römischen Kaiser für die Provinz Niedergermanien (u.a. Precht, 1973; Gechter und Schütte, 2000; Schäfer, 2004). Auch über die Antike hinaus wurde das Praetorium als Sitz der höchsten weltlichen Macht in Köln bis zur Karolingerzeit genutzt (Gechter und Schütte, 2000). Hinweise auf die Existenz eines solchen Statthalterpalastes gibt es in Köln seit Ende des 16. Jahrhunderts (Höhlbaum, 1887). Eine sichere Zuordnung dieser Hinweise und eine systematische Ergrabung der Gebäudereste konnte jedoch erst nach dem 2. Weltkrieg im Jahre 1953 von Otto Doppelfeld durchgeführt werden. Doppelfeld konnte von April bis Oktober 1953 ein ca. 7500 m² großes Areal auf dem Rathausplatz und unter dem im Krieg zerstörten Spanischen Bau des Rathaus ergraben und dokumentieren (Doppelfeld 1956; 1957; 1958). Nach Abschluss der systematischen Grabung von Doppelfeld wurde der nördliche Bereich des spätantiken Praetoriums als Museum unter dem Rathausneubau an der kleinen Budengasse erhalten. Eine zusammenfassende Veröffentlichung der Ergebnisse der Grabung von 1953 erfolgte erstmalig durch Gundolf Precht (1973), der diese zudem mit Ergebnissen aus eigenen Grabungen von 1967/68 ergänzte. Diese Veröffentlichung bildet seitdem die Grundlage für alle weiteren Forschungen am Kölner Praetorium. Daher werden auch in dieser Arbeit die baugeschichtlichen Einordnungen weitestgehend hieraus übernommen. Eine detaillierte Beschreibung der archäologischen Forschungsgeschichte wird in Gechter und Schütte (2000) und Schäfer (2004) gegeben. Zum Verständnis der archäologischen Bezeichnungen der Funde liegen dieser Arbeit im Anhang zwei Pläne bei, denen die Befundbezeichnungen und ihre genaue Lage entnommen werden kann.

BAUGESCHICHTE

Die Baugeschichte des Praetoriums lässt sich nach Doppelfeld (1956) und Precht (1973) in vier Hauptbauphasen unterteilen (Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Bauphasen des Praetoriums (nach Precht, 1973; Gechter und Schütte, 2000).

| Periode | Unterperiode | Datierung | Merkmal |
|---------|--------------|------------------------------|--|
| I | I,1 | Praekolonial | Holzbauphase |
| | I,2 | < 50 n.Chr. | Tiberische Lagerperiode |
| II | II,1 | Koloniegründung/Frühkolonial | Erste Bauphase mit N-S Flucht |
| | II,2 | > 50 n.Chr. | Konchenbau |
| | II,3 | 50-150 n.Chr. | - |
| | II,4 | 50-150 n.Chr. | - |
| III | III,1 | 184/185 n. Chr. | völlige Neugestaltung, Statthalter Didius Julianus |
| | III,2 | 180-300 n.Chr. | - |
| | III,3 | 180-300 n.Chr. | Zerstörung |
| IV | IV,1 | < 355 n. Chr. | Neubau, "regia" |
| | IV,2 | > 388 n.Chr. | Fertigstellung des Palastes |

Periode I

Periode I wird nach Precht (1973) in zwei Unterperioden geteilt. Die älteste von Precht beschriebene Holzbauphase I, 1 wird in die praekoloniale Lagerperiode Kölns eingeordnet. Diese Phase konnte bislang nicht durch Befunde nachgewiesen werden und wird in der jüngeren Literatur als umstritten angesehen (Gechter und Schütte, 2000; Schütte und Gechter, 2011). Die ersten belegten Steinbauten werden der von Precht beschriebenen Bauphase I, 2 zugerechnet und als Reste eines Stabsgebäudes des Lagers, der Principia (Doppelfeld, 1973; Precht, 1973) interpretiert. Andere Quellen deuten das Gebäude als Wohnhaus des Germanicus (Hellenkemper, 1975; Wolff, 2000). Aufgrund vergleichender Bauanalyse mit Funden im Bereich des Doms (Precht, 1971) werden diese Befunde der tiberischen Lagerperiode in der ersten Hälfte des 1. Jahrhunderts zugeordnet. Bei den Hauptbefunden dieser Periode handelt es sich um zwei Trachytmauern im Abstand von 4,2 m, die als Kryptoporticus (Gechter und Schütte, 2000) eines ca. 60m langen Gebäudes interpretiert werden (148 im Westen, 173 im Osten) sowie eine nach Westen geöffnete Apside (455) im Bereich des heutigen Rathausplatzes (Abb. 5.3). Die östliche Mauer der Kryptoporticus weist eine nach Osten gerichtete Piliastergliederung auf, die nach Schäfer (2004) statisch begründet war. Bei weiteren Untersuchungen (Precht, 1973) wurden im Bereich des Rathausplatzes Reste der westlichen der beiden Mauern (148) sowie weitere Fundamente gefunden die ebenfalls der Periode I, 2 zugerechnet werden. Neuste Befunde werden einer massiven Nord-Süd verlaufenden Hangstützmauer zugerechnet, die sich östlich an die bereits erwähnte Apsis (455) anschloss. Diese Mauer wurde nach Osten von massiven, trigonalen Strebpfählen gestützt (Schütte und Gechter, 2011). In weiteren Umbauphasen wurde zwischen den Stützpfählen eine Grauwacke-Gussmauer eingebracht sowie verschiedene Putzschichten aufgebracht (Schütte und Gechter, 2011). Da die Fundamente aller in diesem Bereich ergrabenen Befunde in der gleichen Bauschuttschicht gründen, vermuten Schütte und Gechter (2011) zudem eine weitere, ältere Bauphase in diesem Bereich, für die es jedoch keine gesicherten Belege gibt.

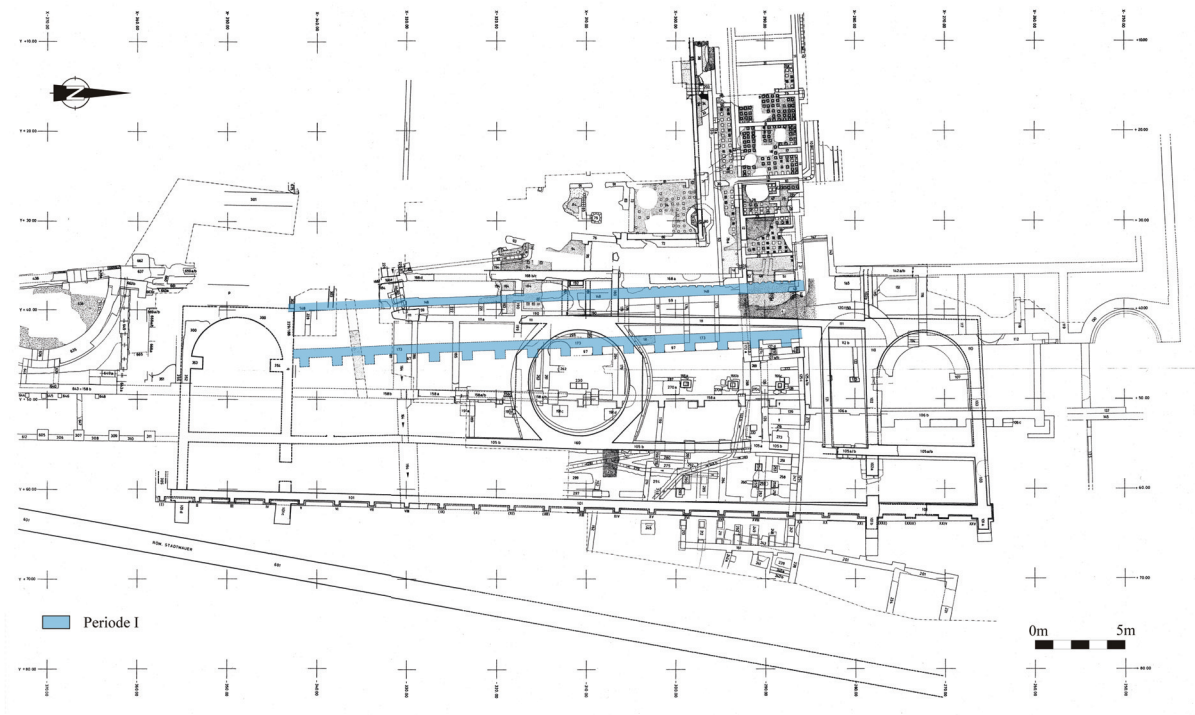


Abbildung 5.3: Erste Bauphase des Praetoriums (nach Precht, 1973).

Die Zugehörigkeit dieser Hangverstärkungen zu einem Vorgängerbau des Praetoriums ist nicht abschließend geklärt. Eine weitere Beschreibung dieser Struktur ist in Kapitel 5.3.2 zu finden. Die Gebäudereste der Periode I, 2 folgen in Ihrer Orientierung dem praekolonialen Stadtplanmuster, welcher um ca. 3° nach Westen vom späteren, nahezu Nord-Süd verlaufenden, römischen Stadtplanmuster abweicht (Gechter und Schütte, 2000). Als Baumaterial dominieren in dieser Phase Trachytblöcke, die mit graubraunem Sand-Kies-Mörtel verbunden sind (Precht, 1973). In Periode I, 2 wird auch die erste nachzuweisende Veränderung der Hangmorphologie eingeordnet. Für die Errichtung der beiden Trachytmauern wurde eine Stufe in die Hangkante gegraben, deren westliche Wand zunächst durch eine Holzkonstruktion gestützt wurde, um weitere Bauarbeiten zu ermöglichen (Schäfer, 2004). Der Aushub dieser Baumaßnahme wurde unterhalb der Stufe genutzt, um den Hang anzuschütten (Precht, 1973). Unabhängig von der Interpretation der Nutzung des Gebäudes waren die Befunde Teil eines mindestens zweistöckigen Gebäudes (Schäfer, 2004).

Im derzeit zugänglichen Museumsbereich finden sich Reste der Periode I, 2 im Fundamentbereich des spätantiken Octogons und im nördlichen Saal (Mauer 173) sowie im so genannten Porticus Areal unter dem Rathaus Hauptgebäude nördlich der großen Apside (635) und auf dem Rathausplatz (Mauerfragment 663a).

Periode II

Die zweite Bauperiode des Praetoriums wird nach Precht (1973) in vier Unterperioden gegliedert (siehe Tabelle 5.1). Die erste Unterperiode II, 1 ist durch den Neubau eines Konchenbaus im Norden der bestehenden Mauern charakterisiert (Abb. 5.4). Der direkte Anschluss dieses Gebäudes erforderte einen Abriss von Teilen der älteren Frontmauer (173). Wie schon sein Vorgängerbau wurde auch der Konchenbau in den zum Rhein hin abfallenden Hang gegründet. In der ersten Unterperiode, die nach Precht (1973) in die Zeit der Koloniegründung um 50 n.Chr. fällt, wurde zunächst eine ca. 45 m lange Frontmauer (112)

mit zwei zum Rhein hin geöffneten Konchen im Norden (130) und Süden (120) errichtet. In dieser Rheinfassade finden sich auch die Zugänge zum Untergeschoß des Gebäudes. Dieses Untergeschoß wurde durch West-Ost verlaufende Mauern (116-119) unterteilt, die im Westen an die Rückwand 142 anschlossen (Precht, 1973; Wolff, 2000).

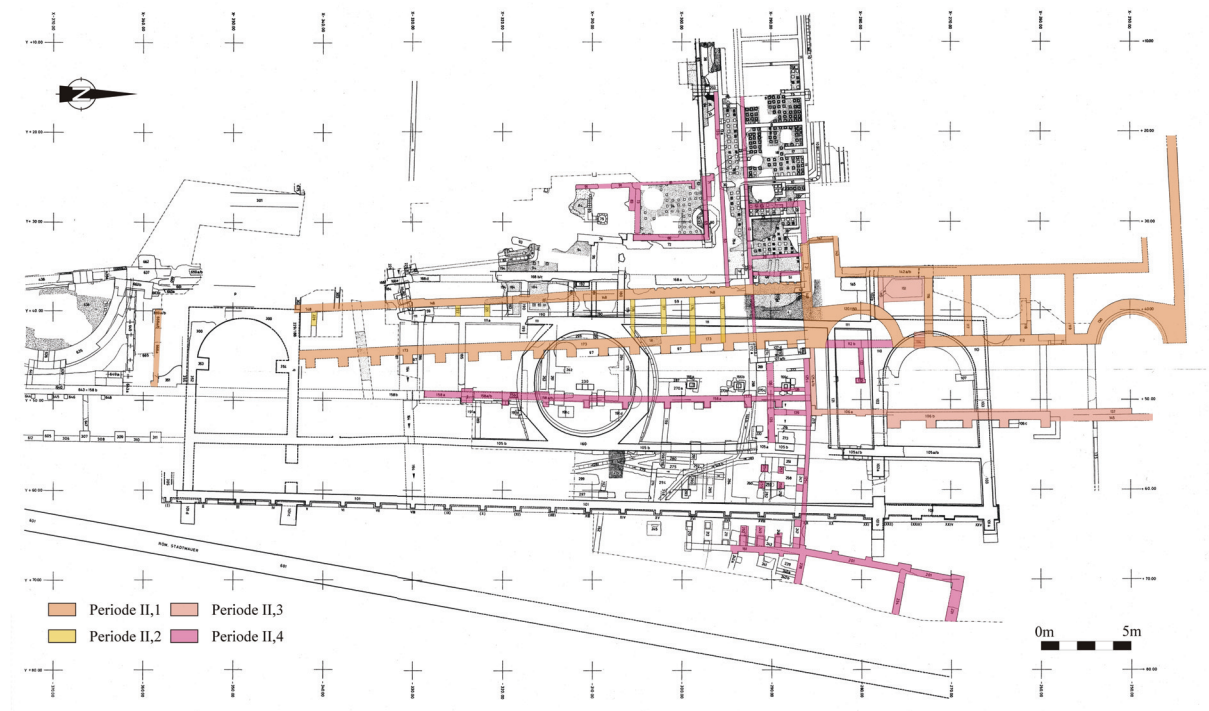


Abbildung 5.4: Zweite Bauphase des Praetoriums (nach Precht, 1973).

Auffallend ist, dass sich die Orientierung des Gebäudes nicht mehr am praekolonialen System orientiert, sondern in seiner Nord-Süd Ausrichtung eher am kolonialen Stadtplan. Dennoch ist die Orientierung des Gebäudes noch nicht mit den späteren Bauphasen identisch, was Precht (1973) als Versuch eines Übergangs vom alten System in das Neue interpretiert. Schäfer (2004) sieht in der abweichenden Orientierung eine mögliche Reaktion auf die geologischen Gegebenheiten im Hang. Hiernach wäre allerdings zu erwarten, dass generell auf solche Gegebenheiten Rücksicht genommen wurde, was trotz der vorherrschenden Inhomogenität des Untergrundes sonst nicht zu beobachten ist.

Als Baumaterial wurden für den Neubau bei der Verblendung des Mauerwerkes rechteckige Grauwackequader verwendet. In der Frontmauer ist zudem ein dreilagiges Ziegelband nachgewiesen (Precht, 1973). Die Mauern wurden sauber verfugt und es sind verstärkte Eckvermauerungen an den Türen zu finden. Die Qualität der kolonialen Bauten hat sich im Vergleich mit den frühen Bauphasen erhöht.

Reste des Konchenbaus sind heute nur noch im nordwestlichen Bereich des Museums an der Kleinen Budengasse zu finden (Abb. 5.9).

Die folgenden Bauperioden II, 2 bis II, 4 werden vor allem durch An- und Umbauten im rheinseitigen Böschungsbereich des Konchenbaus sowie an den südlichen, älteren Gebäuden charakterisiert (Precht, 1973). Einer der massivsten Eingriffe der Bauperiode II, 2 war der Abbruch der obersten Lagen (vermutl. bis ca. 46.0 m ü.N.N.) der östlichen Mauer des Baus der Periode I, 2. In diesem Bereich wurden West-Ost verlaufende Mauern (175-178, 221, 222,

228) errichtet, die mit ebenso orientierten Tonnengewölben überspannt wurden. Diese Kammern wurden vermutlich als Sklaven- und Bedienstetenunterkünfte genutzt (Precht, 1973). Als Baumaterial für die Gewölbe wurden mörtelgebundene Tuffblöcke genutzt (Precht, 1973).

Im heutigen Museumsbereich sind nur noch Reste der West-Ost verlaufenden Trennmauern 175-177 im westlichen Fundamentbereich des nördlichen Saales des spätantiken Gebäudes zu finden (Abb. 5.9).

In Bauperiode II, 3 kam es zu einer Erweiterung des Konchenbaus nach Osten. Hierzu wurde eine mit Lisenen versehene neue Frontmauer (106a) in einem Abstand von 6.5 m vor der bestehenden Frontmauer 112 errichtet. Im Norden und Süden wurde durch West-Ost verlaufende Mauern ein Anschluss an das bestehende Gebäude geschaffen (Doppelfeld, 1956). Im Konchenbau selbst wurde eine neue Türöffnung in die ehemalige Frontmauer eingebaut, um so den neuen Gebäudeteil über eine Treppe mit dem bestehenden Gebäude zu verbinden. Nach Doppelfeld (1956) wurde in den bestehenden Kellerräumen ein Wasserbecken eingerichtet. Die neu errichtete Rheinfassade folgt erstmals dem kolonialen Stadtplan mit einer genauen Nord-Süd Ausrichtung. Als Baumaterial für die neue Frontmauer wurden gleichmäßig gearbeitete Tuffquader verwendet (Precht, 1973). Im heute noch zugänglichen Areal sind Reste der Frontmauer 106a erhalten, die den nördlichen Apsidensaal der spätantiken Periode in Nord-Südrichtung kreuzen (Abb. 5.9).

In Periode II, 4 wurde im Süden des Hauptbaues eine weitere Frontmauer (158a) vor den Gewölben der Bauphase I, 2 errichtet (Precht, 1973). Im Norden grenzte diese Mauer direkt an den Konchenbau. Diese sehr sauber errichtete, mit Piliastern versehene Mauer wird noch heute aufgrund ihrer Ausführung als „Schöne Mauer“ bezeichnet (Wolff, 2000). Unklar ist wie weit sich diese Mauer nach Süden erstreckte. Nach Doppelfeld (1956) endet sie knapp 50 m südlich des Konchenbaus; Precht (1973) vermutet eine Erstreckung bis auf den heutigen Rathausplatz. Neben der Erweiterung der Rheinfassade wurde im Anbau des Konchenbaus der Kellerbereich aufgeschüttet und die Fenster verschlossen (Precht, 1973). Als Baumaterial für die „Schöne Mauer“ 158a wurden Grauwacke-, Tuff- und Kalksteinblöcke zur Verblendung verwendet. Auffallend sind zudem dreilagige Ziegelbänder im Mauerwerk (Precht, 1973). Das aufgehende Mauerwerk war mit Putz versehen (Precht, 1973). Die Frontmauer 158a ist heute noch im Museumsbereich unter den Fundamenten des spätantiken Gebäudes im nördlichen Saal und dem Oktogon zu sehen (Abb. 5.5).

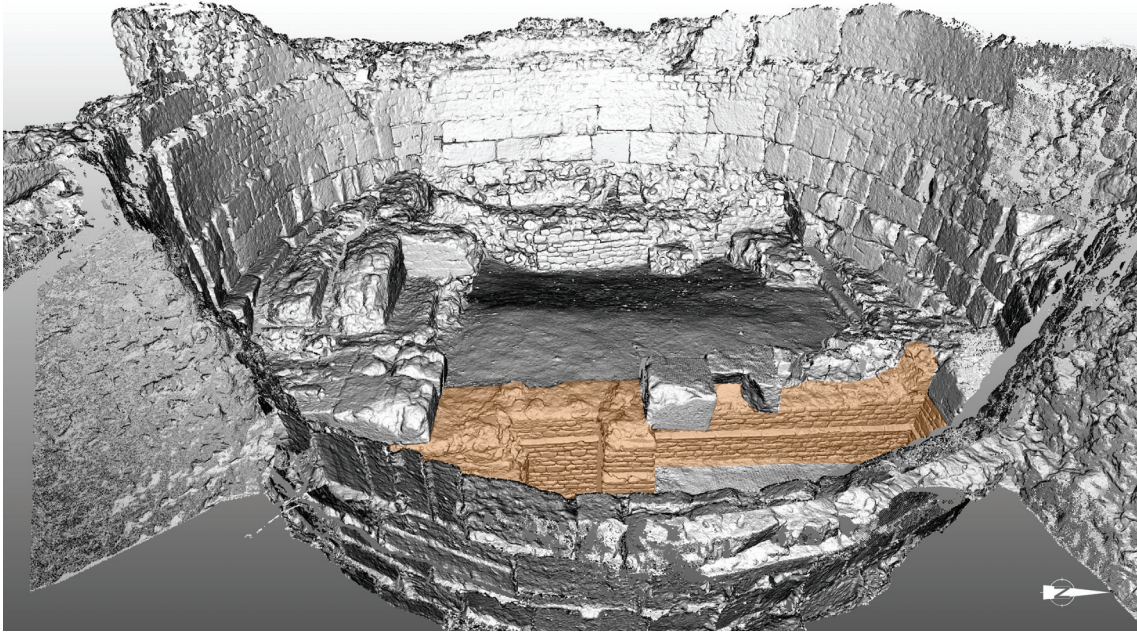


Abbildung 5.5: Fundamente der Frontmauer des Praetoriums der zweiten Bauphase (158a) im Untergrund der Octogons der vierten Bauphase.

Im Bereich des Rathausplatzes kam es während der zweiten Bauphase des Praetoriums ebenfalls zu Umstrukturierungen. Im Bereich der heute erhaltenen Apsis entstand ein massives Podest aus Tuffblöcken, welches im Osten von einer Lisenenmauer gestützt wurde (Schütte und Gechter, 2011). Die Ausrichtung der Bauten richtet sich nun auch auf dem Rathausplatz erstmals nach dem kolonialen Stadtplan. In der Folgezeit wurde die Struktur des Bauplatzes mit einer Grauwacke-Guss-Apsis verändert, an die sich vermutlich nach Westen ein Gebäude anschloss. Die römischen Baureste im Bereich der Apsis werden in Kapitel 5.3.2 beschrieben.

Im Anschluss an Periode II, 4 kam es zu weiteren Baumaßnahmen, die Precht jedoch noch nicht der Bauperiode III zuordnen will. Auf dem angeschütteten Bereich direkt an der Stadtmauer wurde ein Gebäudekomplex errichtet, der durch eine Pfeilerhalle mit den westlichen Bauten verbunden wurde (Doppelfeld, 1956; Wolff, 2000). Diese Verbindung erforderte eine erneute Umgestaltung der Frontmauer 158a im Westen und des ebenfalls gerade erst errichteten, als „Haus an der Stadtmauer“ bezeichneten, Gebäudekomplexes im Osten.

Die Datierung der einzelnen Unterperioden der zweiten Bauphase ist nach Precht (1973) sehr schwierig. Allein der Zeitraum der kompletten zweiten Periode von der Zeit der Koloniegründung um 50 n. Chr. bis zur Mitte des 2. Jahrhunderts scheint geklärt.

Periode III

Die dritte Bauperiode des Praetoriums ist baulich sehr schwer zu fassen, da es umstritten ist welche Teile der weitreichenden Bebauung zu dieser Zeit noch mit dem Praetorium in Verbindung zu bringen sind. Die Periode wird nach Precht (1973) in drei Unterperioden, nach Wolff (2000) in zwei Unterperioden gegliedert und ist durch eine Neubebauung des kompletten Areals gekennzeichnet (Abb. 5.6).

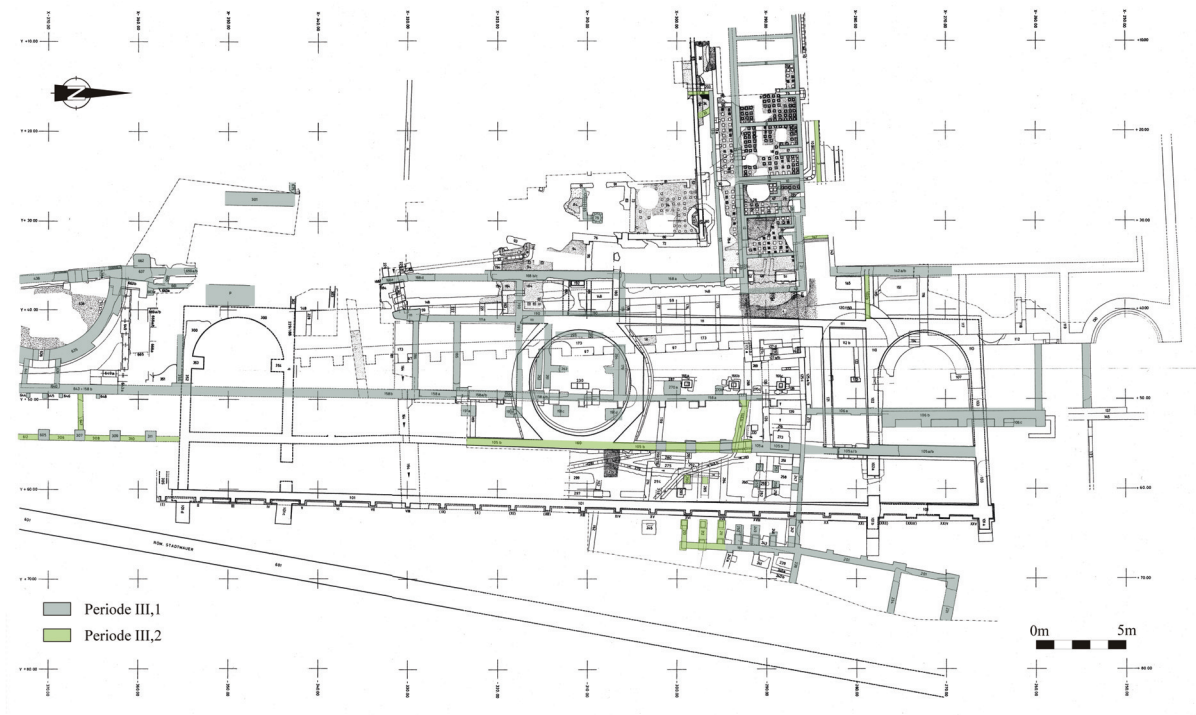


Abbildung 5.6: Dritte Bauphase des Praetoriums (nach Precht, 1973).

Vor der Neugestaltung des Bereiches wurde die Bebauung der früheren Phasen abgerissen, alte Kellerbereiche verfüllt sowie das Gelände im Westen auf der Terrasse planiert (Precht, 1973). Von der ursprünglichen Bebauung blieben nur das „Haus an der Stadtmauer“ sowie die Pfeilerhalle erhalten (Wolff, 2000). Vermutlich in der ersten Unterperiode III, 1 (nach Precht, 1973) wurde im Bereich der ehemaligen Kryptoporticus auf den Resten der „Schönen Mauer“ (158a) eine neue Mauer errichtet (158b), die zusammen mit der östlich davon neu entstandenen Rheinfassade 105b ein zweistöckiges Galeriegebäude bildete (Precht, 1973; Wolff, 2000). Die westliche Mauer 158b kann bis in den Bereich des Rathausplatzes verfolgt werden. Die rheinseitige Mauer 105b kann im nördlichen Bereich der ehemaligen Kryptoporticus sowie im südlichen Porticusbereich nachgewiesen werden.

Für den Bereich des nördlichen Rathausplatzes sind derzeit keine Befunde dokumentiert. Bei den geplanten Grabungen für die Archäologische Zone im sind jedoch neue Erkenntnisse zu erwarten. Precht (1973) rekonstruiert aus den Befunden eine ca. 95 m lange, östliche Frontfassade, die durch die segmentförmigen Bögen (Abb. 5.7) geprägt wird.

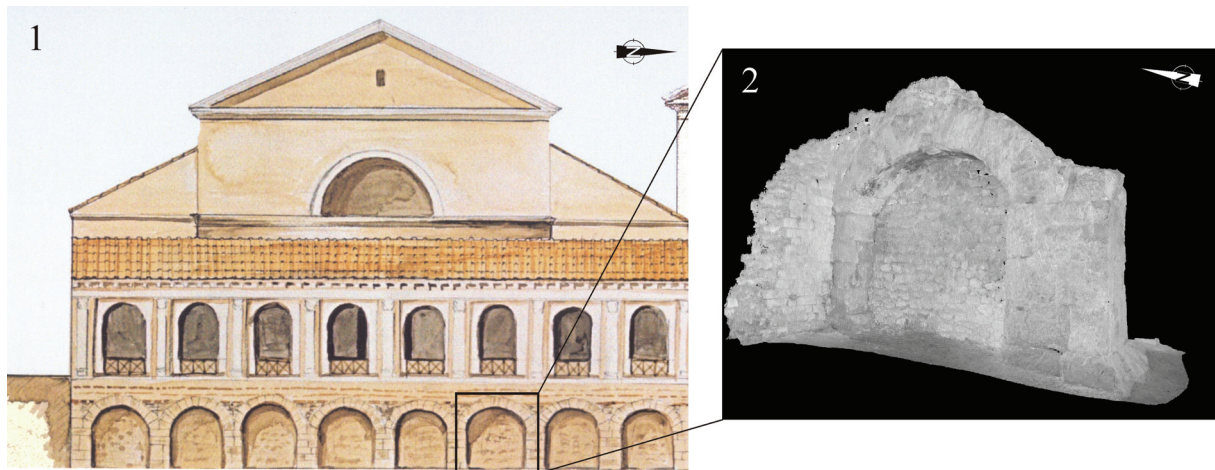


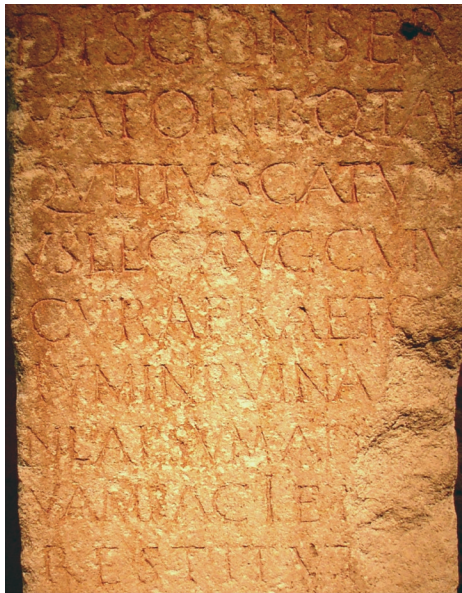
Abbildung 5.7: Rekonstruktion der dritten Bauphase des Praetoriums (Schütte und Gechter, 2011) und ein 3D-Modell der erhaltenen Porticus Stellung. (2) zeigt eine Ansicht der Innenseite der Stellung.

Einige dieser Bogenstellungen zeigen Spuren einer Vergitterung (Schäfer, 2004). Im Süden und Norden wurde diese Galerie durch Flügelbauten begrenzt (Precht, 1973). Im westlichen Bereich des Galeriegebäudes schlossen sich mehrere Räume unterschiedlicher Größe an (Wolff, 2000).

Im südlichen Bereich des Rathausplatzes wurde zeitgleich oder kurz zuvor, westlich der Galerie die massive Apsis errichtet, die heute noch (nach verschiedenen Umbauphasen) den Rathausplatz prägt. Bei der Errichtung der Apsis wurden die Reste der Vorgängerbauten in die Fundamente integriert (Schütte und Gechter, 2011). Die ehemalige Lisenenstützmauer wurde nun durch die nach Osten vorgelagerte Porticus Galerie mit ihrer westlichen Mauer 158b ersetzt. Ein zugehöriger, angeschlossener Bau im Westen der Apsis wird von Schütte und Gechter (2011) ausgeschlossen, wenngleich eine Bebauung des Bereiches mit höherem Laufniveau nachgewiesen werden kann.

Precht (1973) interpretierte diese Befunde als Reste einer basilikalen Pfeilerhalle. Neue Erkenntnisse (Schütte und Gechter, 2011) sehen in den Befunden einen Vorgängerbau der jüdischen Synagoge. Weitere Erläuterungen hierzu werden in den Kapiteln zu den Untersuchungen auf dem Rathausplatz gegeben.

Zeitlich wird die Bauperiode III, 1 um 180 n.Chr. (Doppelfeld, 1956; Precht, 1973; Gechter und Schütte, 2000) eingeordnet. Diese Zuordnung erfolgt, neben Ziegelstempeln mit dem Namen des Statthalters *Didius Julianus* (Precht, 1973) über eine Weihinschrift (Abb. 5.8) die sich auf den Statthalter *Quintilius Tarquitius Catulus* bezieht.



DIS CONSER
Den Göttern, den bewah-
VATORIB(us) Q(uitus) TAR
renden, Quintus Tar-
QVITIVS CATVL
quintius Catul-
VS LEG(atus) AVG(usti) CVIV(s)
us, Legat des Kaisers, durch dessen
CVRA PRAETO(r)
Sorge das Praetor-
IVM IN RVINA(m co)
ium, das in Ruinen ge-
NLAPSVUM AD(no)
fallen war, in neu-
VAM FACIE(m est)
er Gestalt ist
RESTITVT(vm)
wiederhergestellt worden.

Abbildung 5.8:
Weihinschrift aus der
dritten Bauphase des
Praetoriums mit
Bezug auf den
Statthalter *Quintilius*
Tarquitius Catulus
(Übersetzung nach
Wolff, 2000).

Die Neubebauung des Areals dieser Phase hat also vermutlich einen längeren Zeitraum in Anspruch genommen, so dass einige Bereiche zur Zeit des *Didius Julianus* errichtet wurden. Die endgültige Fertigstellung erfolgte jedoch vermutlich erst zu Zeit des *Quintilius Tarquitius Catulus* (Precht, 1973; Gechter und Schütte, 2000).

Neben den Veränderungen in der Gebäudestruktur wurde in der Bauphase III, 1 erneut die Hangmorphologie im westlichen Bereich, durch die Aufschüttung mit Abbruchschutt älterer Bauphasen verändert (Precht, 1973). Diese Abbruchmaterialien wurden zudem als Baumaterial in den Grundmauern der neuen Gebäude verwendet (Precht, 1973).

Im heutigen Areal sind die Befunde der Bauperiode III, 1 vorwiegend im südlichen Porticus Bereich erhalten. Dort finden sich neben einer kompletten Bogenstellung noch Reste der westlichen Mauer 158b. Auch im Bereich des Rathausplatzes konnten die massiven Tufffundamente bei den aktuellen Grabungen freigelegt werden. Die Bauperioden III, 2 und III, 3 werden von Precht (1973) gemeinsam betrachtet, wonach man auch der Zerteilung der dritten Bauperiode nach Wolff (2000) folgen kann.

Precht (1973) benennt für die Zeit der Bauperioden III, 2 und III, 3 eine Brandkatastrophe für das Praetorium, ohne jedoch näher auf seine Quellenlage einzugehen. Dieser Brand machte weitreichende Umbauten und Reparaturen notwendig. Zunächst wurden die Bogenstellungen zum Rhein hin vermauert und mit Zerstörungsschutt verfüllt. Die Fassade wurde im Anschluss dekorativ verputzt (Precht, 1973). Im nördlichen Bereich wurde der schon bestehende Pfeilerbau erweitert. Wolff (2000) erwähnt eine konstantinische Münze (309-313 n. Chr.), die im Schutt hinter den verfüllten Arkaden gefunden wurde und schließt daraus, dass die Wiederherstellung des Gebäudes frühestens am Anfang des 4. Jahrhunderts erfolgt sein kann. Doppelfeld schreibt diesen Münzfund der letzten römischen Bauphase IV zu und datiert damit die Umbaumaßnahmen auf vorkonstantinische Zeit (Doppelfeld, 1956). Auch im Bereich des Rathausplatzes kam es zu weiterer Bautätigkeit (vergl. Kap. 5.3). Abb. 5.9 zeigt eine Übersicht über die erhaltenen Befunde der Bauphasen I, II und III.

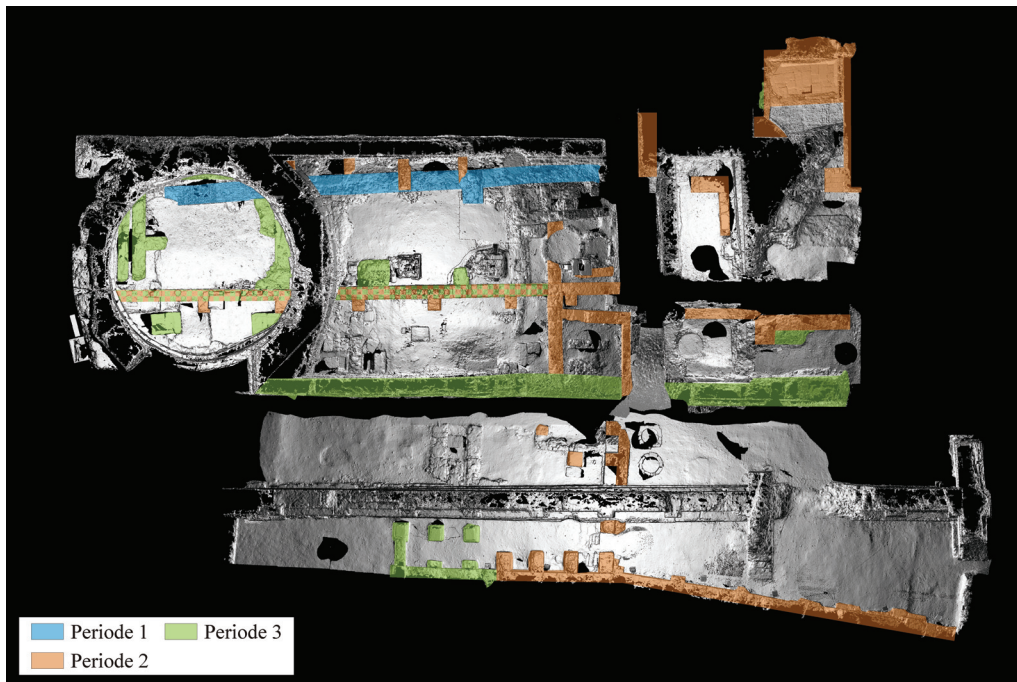


Abbildung 5.9: Erhaltene Befunde der Bauphasen I, II, und III. Im Hintergrund liegt ein Orthophoto der 3D-Punktwolken aus dem Museumsbereich des Praetoriums.

Periode IV

In der vierten Bauperiode wurden die bestehenden Gebäude in zwei Phasen zu dem repräsentativen Palastbau des spätrömischen Praetoriums (Abb. 5.10) umgebaut und erweitert.

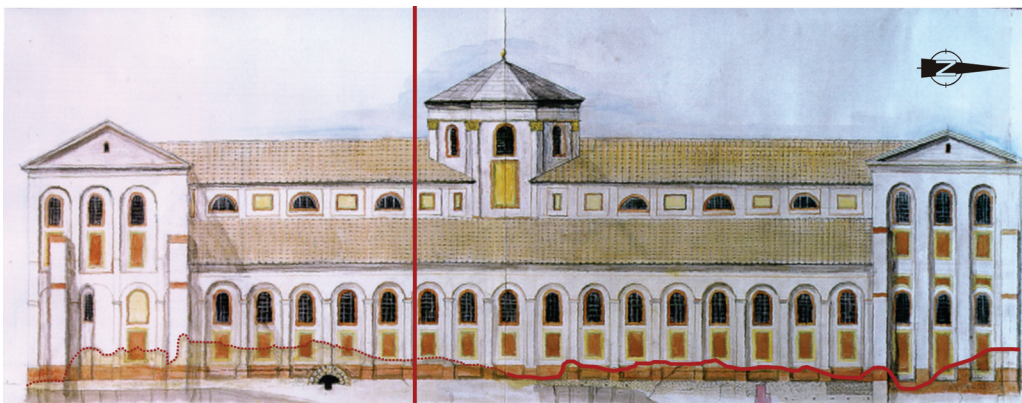


Abbildung 5.10: Rekonstruktion der vierten Bauphase des Praetoriums (nach Schütte, 1999). Die horizontale rote Linie markiert die erhaltenen Abschnitte (gestrichelt: derzeit nicht ergraben). Die vertikale Linie zeigt die Grenze des derzeitigen Museumsbereiches. Der südliche Teil des Praetoriums ist momentan nicht ergraben.

Besonders kennzeichnend ist hierbei, dass der Bau erneut nach Osten erweitert wurde (Precht, 1973). In Periode IV, 1 wurde zunächst eine neue Rheinfront mit Piliastern (101) von Süden zur Nordgrenze des späteren Octogons gebaut. Den südlichen Gebäudeabschluss bildete ein Ost-West orientierter Apsidensaal. Nach Precht (1973) kam es im Zuge dieser Bauarbeiten zu einer Konstruktionsänderung, die vermutlich mit der Planung des zentralen Octogons zu tun hatte. Im Zuge dieser Änderung entstand der Bau, dessen Fundamente und Teile des aufgehenden Mauerwerkes auch heute noch im Museum an der Kleinen Budengasse zu sehen sind.

Die Frontmauer (101) wurde nach Norden erweitert. Im Norden entstand analog zum südlichen Gebäudeabschluss ein Apsidensaal. Die Verbindung zwischen den Apsidensälen und dem zentralen Octogon bildeten zwei große Säle, die wie die Apsidensäle mit Vorhallen versehen wurden. Dem Gesamtbau nach Osten vorgelagert war ein ungeteilter, lang gestreckter Raum der von Precht (1973) als Porticus Galerie benannt wird. Im Süden auf dem Rathausplatz wird in die Apsis ein Hypocaustfussboden eingebaut. Nach kurzer Nutzung wurde der hypocaustierte Bereich wieder abgebrochen und die Apsis weitestgehend verfüllt. Aufgrund dieser Baustruktur vermuten Schütte und Gechter (2011) ein geplantes Gebäude im westlichen Anschluss an die Apsis, welches jedoch nie realisiert wurde. In späterer Zeit kam es in diesem Bereich zu weiteren Umbaumaßnahmen, die im Kapitel zum antiken Brunnen behandelt werden. Zeitlich wird die vierte Bauperiode des Praetoriums von Doppelfeld (1956) und von Gechter und Schütte (2000) in die konstantinische Zeit um 310 n. Chr. eingeordnet, in der auch die Rheinbrücke und das Kastell Deutz entstanden sind (Precht, 1973). Precht (1973) folgt dieser Datierung in Ansätzen, hält jedoch auch einen späteren Bauzeitpunkt für möglich, je nach dem welcher Bauperiode der oben erwähnte konstantinische Münzfund zugeordnet wird. Aus historischen Quellen lässt sich die Existenz des Praetoriums für das Jahr 355 belegen. Ammianus Marcellinus (ca. 391 veröffentlicht) schreibt über die Ermordung des Usurpators *Silvanus* in der *regia* von Köln, welche von Gechter und Schütte (2000) als Praetorium der vierten Bauperiode angenommen wird.

BAUBESCHREIBUNG

Da im Zuge dieser Arbeit hauptsächlich Befunde aus der finalen Bauphase bearbeitet wurden, wird im folgenden Abschnitt eine Baubeschreibung dieser spätantiken Phase des Praetoriums gegeben. Precht (1973) beschreibt das Gebäude als „*stattlichen, breitgelagerten Bau mit Porticus und seitlichen Risaliten*“, an den im Westen eine Hofanlage anschloss (Abb. 5.11).

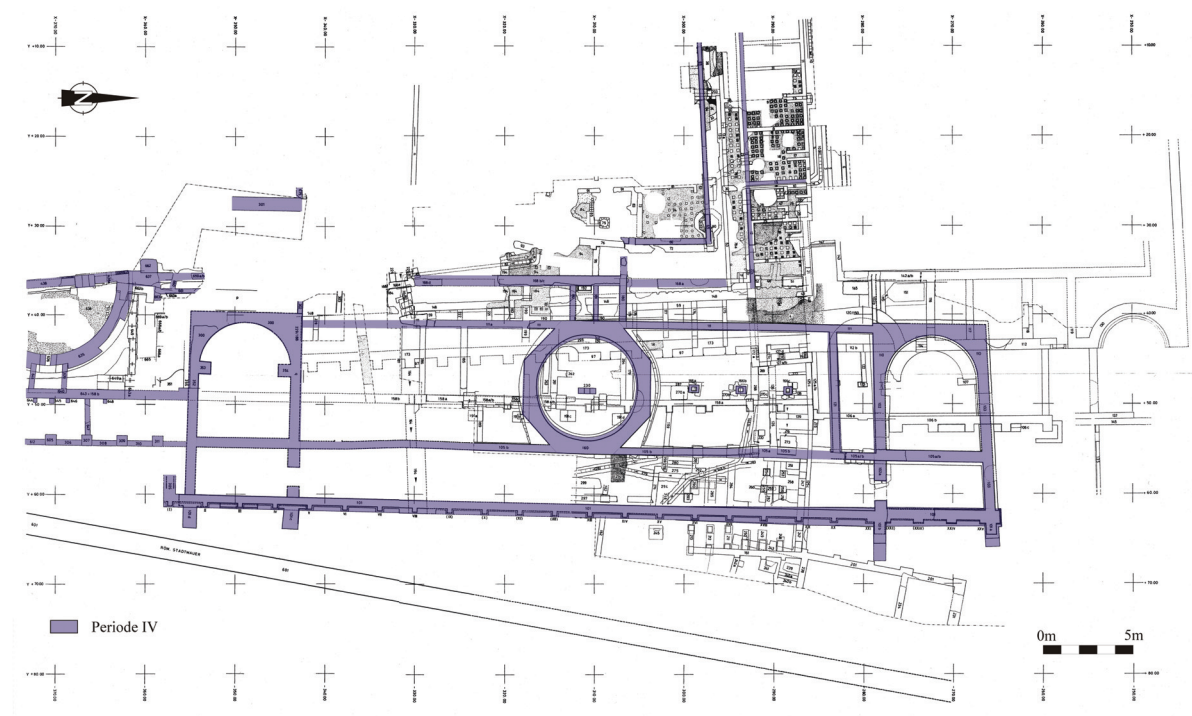


Abbildung 5.11: Vierte Bauphase des Praetoriums (nach Precht, 1973).

Im Zentrum lag ein ca. 28 m hoher oktogonaler Saal mit einer Kuppel (Gechter und Schütte, 2000). Im Norden und Süden schlossen sich, die bereits erwähnten großen Hallen an, welche im Weiteren als nördlicher Saal und südlicher Flügel bezeichnet werden. Im Anschluss daran liegt im Norden und Süden jeweils ein Apsidensaal. Die Rheinfront wird von der großen Porticusgalerie gebildet.

Rheinfront

Die rheinseitige, piliastergegliederte Fassade (Mauer 101) der vierten Bauperiode begrenzt sowohl die beiden Apsidensäle als auch die Porticus Galerie nach Osten (Abb. 5.11). Die innere Gliederung des Baus lässt sich anhand von vier Wandfortsätzen (101a-d) auch an der Ostseite der Fassade nachvollziehen (Precht, 1973). Die Rheinfassade lässt sich demnach in einen südlichen Bereich, der den südlichen Apsidensaal nach Westen begrenzt, einen zentralen Teil, der die Porticus Galerie umfasst und einen nördlichen Abschnitt, der den nördlichen Apsidensaal begrenzt, gliedern. Die Gesamtlänge dieser Rheinfront betrug nach Precht (1973) 90.3 m, nach Schütte (pers. Mitteilung, 2010) 94m. Die gesamte Rheinfassade wurde in zwei Bauabschnitten ausgeführt. In einem ersten Bauabschnitt wurde die Mauer bis zum Piliaster XV errichtet. Im zweiten Bauabschnitt wurde die Mauer bis zum Eckpfeiler 101d errichtet und einige Umbaumaßnahmen im südlichsten Abschnitt durchgeführt. Der südliche Bereich der Rheinfassade, welcher schon länger bekannt war, konnte im Zuge der Grabungen von 1968 unter dem Hansasaal des Rathauses genauer untersucht werden (Precht, 1973). Der südliche Abschnitt zeigt eine Abweichung von der Symmetrie des Gesamtgebäudes. Zunächst fällt auf, dass im Süden das Äquivalent des im Norden nachgewiesenen Eckpfeilers des Gebäudes fehlt. Dies begründete Doppelfeld (1956) mit der unmittelbaren Nähe zur römischen Stadtmauer. Eine weitere Asymmetrie zeigt sich im Wandvorbau 101d. Dieser liegt nicht wie sein nördliches Äquivalent auf der Ecke des Gebäudes, sondern ist um 2.15 m nach Norden versetzt und ist mit einer West-Ost Ausdehnung von 2.25 m wesentlich länger als der nördliche Vorsprung 101a (Precht, 1973). Gemeinsam mit dem den Südabschnitt nach Norden begrenzenden Wandvorsprung 101c zeigt der Vorsprung 101d eine leichte Rotation nach Süden. Im Gegensatz zu den nördlichen Wandvorsprüngen fehlt ein geböschter Fundamentfuß. Die Fundamente der eigentlichen Mauer bestehen aus opus caementicium, der in eine abgestrebte Baugrube eingebracht wurde (Precht, 1973). Auf der Fundamentoberkante bei 46.0 m ü.NN setzt die mit Tuffhandquaden verblendete Frontmauer an, welche ab einer Höhe von 46.9 m ü.NN durch Piliaster und zurückgesetzten Wandfelder gegliedert ist. Diese Wandgliederung deckt sich mit der Gliederung der Wand nördlich des Wandvorsprungs 101c aber nicht mit der Gliederung im nördlichen Teil der Fassade und wurde in einer nachträglichen Umbauphase vermauert. Für die römische Zeit sind zwei Verputzschichten für den oberen Teil der Mauer nachgewiesen (Precht, 1973). Das ursprüngliche Laufniveau östlich der Frontmauer wurde von Doppelfeld (1956) bei 46.9 m ü. NN. am Ansatz der Piliaster gesehen. Precht (1973) sieht im höheren Ansatz des Verputzes und der baulich nachlässig ausgeführten Vermauerung der Wandfelder im unteren Bereich, Belege für einen Laufhorizont bei 48.3 m ü.NN

Der mittlere Abschnitt der Frontfassade, zwischen den Wandvorsprüngen 101c im Süden und 101b im Norden, bildet auf einer Länge von 63.88 m die Ostwand der Porticus Galerie (Abb. 5.12). Die Wand wird von insgesamt 17 Piliasten gegliedert, die wie schon im südlichen Teil in einer Höhe von 46.9 m auf einer Fundamentbank aufsitzen (Precht, 1973). In der Piliastergliederung sind im Norden und Süden zwei Abweichungen zu erkennen. Der südlichste Piliaster V wurde auf 1.57 m verbreitert, was Precht (1973) mit den Umbauten im südlichen Bereich der Mauer in Verbindung bringt. Der nördlichste Piliaster des Mittel-

abschnittes setzt direkt am Wandvorsprung 101b an. In Höhe des Piliasters VIII trat ursprünglich ein Abwasserkanal (164) aus der Wand aus, der bis auf die im Westen gelegene Terrasse verfolgt werden kann (Precht, 1973). Dieser Kanal war vermutlich für Wartungsarbeiten nach der Errichtung der darüber liegenden Gebäude unzugänglich, daher kann eine kontrollierte Drainage über die gesamte Standzeit des Gebäudes nicht nachgewiesen werden. In der Fundamentierung des mittleren Abschnittes der Rheinfassade zeigt sich zwischen den Piliastern XV und XVI ein deutlicher Wechsel (Precht, 1973). Bis zum Piliaster XV setzt sich das schon aus dem südlichen Abschnitt bekannte Gussfundament fort. In diesem Bereich läuft das Gussfundament aus und wird von einem jüngeren Fundament mit Tuffquaderverblendung ersetzt (Precht, 1973). Dieser Fundamentwechsel markiert auch die Grenze der beiden Bauphasen der Frontmauer. Aus weiteren Untersuchungen im nördlichen Teil und an der Ostseite des Mittelabschnittes schließt Precht (1973) auf eine generell flachere Fundamentierung nördlich des Fundamentwechsels. Im südlichen Bereich reichte das Gussfundament eine Tiefe von 40.2 m ü.NN, im Bereich des Fundamentwechsels konnte die Unterkante aufgrund von anderen römischen Bauteilen in einer Tiefe von 39.3 m ü.NN noch nicht gefunden werden. In der Höhe des Wandvorsprungs 101b reicht die Fundamentierung nur auf eine Höhe von 42.6 m ü. N.N. herab, wobei hier ein Gussfundament auf Pfahlgründungen zu finden war (Precht, 1973).

Der nördliche Bereich der Rheinfassade, der von den Wandvorsprüngen 101b und 101a begrenzt wird (Abb. 5.11) ist aufgrund von Kriegsschäden nur noch in Teilen erhalten (Precht, 1973). Die Piliastergliederung ähnelt der des mittleren Abschnittes, weist aber nach Precht (1973) veränderte Abmessungen auf. Die Piliaster beginnen in diesem Bereich um ca. 0.2 m zurückgesetzt bei einer Höhe von 46.8 m ü.NN über einem tuffverblendeten Fundamentsockel (Precht, 1973). Als Abweichung von der Gesamtsymmetrie sind die beiden Wandvorsprünge zu nennen, von denen der nördliche (101a) als Eckpfeiler ausgeführt ist und der südliche (101b) eine deutlich größere Vorsprungsweite aufweist.

Der Verputz der gesamten Rheinfassade wies zu römischen Zeiten vermutlich eine dekorative Bemalung auf (Precht, 1973). Der untere Wandfuss sowie die Ecken und Wandungen der Piliaster waren braunrot gestrichen. Die restlichen Flächen setzten sich mit einem hellen Farbton von dieser Akzentuierung ab. Im heutigen Museumsbereich sind die Reste der Rheinfassade vom Piliaster XIV im Süden, bis zum Eckvorsprung 101a im Norden erhalten (Abb. 5.12).



Abbildung 5.12: Erhaltene Bereiche der rheinseitigen Fassade der vierten Bauphase.

Porticus Galerie

Die Porticus Galerie ist ein ca. 64 m langer und knapp 6 m breiter Raum, der sich westlich dem Hauptbau vorgelagert, zwischen den Apsidensäulen im Norden und Süden erstreckt. Die östliche Begrenzung der Porticus Galerie bildet die oben beschriebene Rheinfassade. In Höhe des auf der Außenseite ansetzenden Piliasters XIX wurden zwei ältere Mauern (247, 125) überbaut. Dies ist an der Innenseite durch eine Bogenkonstruktion belegt, welche die älteren Befunde überspannt (Precht, 1973). Im Norden wird die Porticus Galerie durch die Pfeiler 102a im Westen und 101b im Osten begrenzt, die ursprünglich nach Precht (1973) mit einem Segmentbogen überspannt waren. Im Süden vermutet Precht (1973) ein Äquivalent in den Pfeilern 101c im Osten und 229a im Westen, Der Zweck dieser Bogenkonstruktionen ist bislang nicht geklärt. Nach Precht (1973) können sie nicht als Zugänge zu den Vorhallen der Apsidenhalle genutzt worden sein, da die Porticus Galerie bis auf Erdgeschossniveau (ca. 50.6 m ü.NN) verfüllt war. Belegen lassen sich die Befunde bislang nur im Norden, da der südliche Bereich ab der Höhe des zehnten Piliasters an der Rheinfassade bislang nicht ergraben wurde. Neue Erkenntnisse werden sich erst während der Grabungen zur Archäologischen Zone ergeben. Die westliche Begrenzung der Porticus wird durch Mauer 105b gebildet, die auf den Resten der älteren Porticusfront aus der dritten Bauperiode errichtet wurde (Precht, 1973). Über diesen Resten wurde im nördlichen, an das Octogon anschließenden Bereich ein flaches, ausgleichendes Fundament aus Tuffquadern errichtet, auf dem die aufgehende Mauer anschliesst (Precht, 1973). In den Fundamenten konnten zudem insgesamt vier Pfeiler einer Arkatur aus der dritten Bauphase nachgewiesen werden, die in den Unterbau integriert wurden (Precht, 1973). Diese Fundamentierung unterscheidet sich deutlich von den tiefen Fundamenten des Octogons. Aus diesem Befund, zusammen mit einer durchgehenden Fuge zwischen Octogon und dem nördlichen Teil der westlichen

Porticuswand 105b, schließt Precht (1973) auf unterschiedlichen Bauphasen der beiden Bereiche. Zunächst wurde das Octogon mit vorgearbeiteten Wandanschlüssen errichtet, an die dann die Mauer 105b angefügt wurde (Precht, 1973). Zur Gesamtform der Porticus lässt sich sagen, dass die Galerie unmittelbar vor dem Octogon eine Breite von 5.95 m aufweist und sich nach Norden auf 5.49 m verjüngt. Dies ist auf eine Veränderung der Flucht der westlichen Wand nach Nordosten zurückzuführen. Precht (1973) sieht einen möglichen Grund in der Nutzung der Reste älterer Bauphasen in den Fundamenten. Ob sich eine analoge Verjüngung der Galerie auch im Süden findet kann nur durch die geplanten Ausgrabungen belegt werden.

Im heutigen Museumsbereich ist der Teil nördlich des Octogons bis zum Übergang in die Vorhalle des Apsidensaals erhalten (Abb. 5.13).



Abbildung 5.13: Erhaltene Bereiche der Porticus Galerie der vierten Bauphase.

Vorhallen der Apsidensäle

Den beiden Apsidensälen im Norden und Süden ist jeweils eine Halle nach Osten vorgelagert. Die Vorhalle des nördlichen Apsidensaales wird vom nördlichsten Abschnitt der Frontmauer 101 nach Osten, von Mauer 105a/b im Westen, von Mauer 103 im Norden sowie von den Wandvorsprüngen 101b und 102a im Süden begrenzt. Der trapezoide Raum hat eine Nord-Süd-Erstreckung von ca. 11 m und eine West-Ost-Erstreckung von ca. 5 m. Die besondere Form des Raumes entsteht dadurch, dass die Nord- und Südwand nicht rechtwinklig an die Ost- und die Westwand gesetzt sind und zudem nicht parallel zueinander verlaufen (Precht, 1973). Die rheinseitige Frontmauer ist in diesem Bereich auf einer 0.8 m starken Fundamentplatte bis auf 42.8 m ü.NN in Auffüllungen gegründet (Precht, 1973). Das Gussfundament der Nordwand reicht auf eine Höhe von 42.6 m ü.NN herunter, beginnt

jedoch schon bei 45.3 m ü.NN und ist damit wesentlich mächtiger als das Fundament der Rheinfront (Precht, 1973). Die Westwand der Vorhalle (105a/b) ist nach Precht (1973), wie schon im südlichen Teil der Porticus Galerie auf den Fundamentresten der älteren Mauer 105a gegründet. Die Südbegrenzung wird durch die beiden Wandvorsprünge 101b und 102a gebildet, die rechtwinklig an die Rheinfassade bzw. die westliche Wand 105b anschließen. Während der östliche Vorsprung 101b auf der Fundamentplatte der Frontmauer gegründet ist, wird das Fundament des westlichen Vorsprungs 102a aus wieder verwendeten Tuffquadern aufgebaut (Precht, 1973). Im Gesamtbild fällt ein Ziegelband in einer Höhe von ca. 48.2 m ü. N.N. auf, das sich in allen Wänden verfolgen lässt.

Im heutigen Museumsareal sind nur noch die Nordostecke, der Wandvorsprung 101b sowie Reste der südlichen Westwand mit dem Wandvorsprung 102a zu sehen. Dies ist teilweise durch Kriegsschäden, teilweise durch bauliche Maßnahmen bei der Errichtung des Rathausbaues zu begründen (Abb. 5.14).

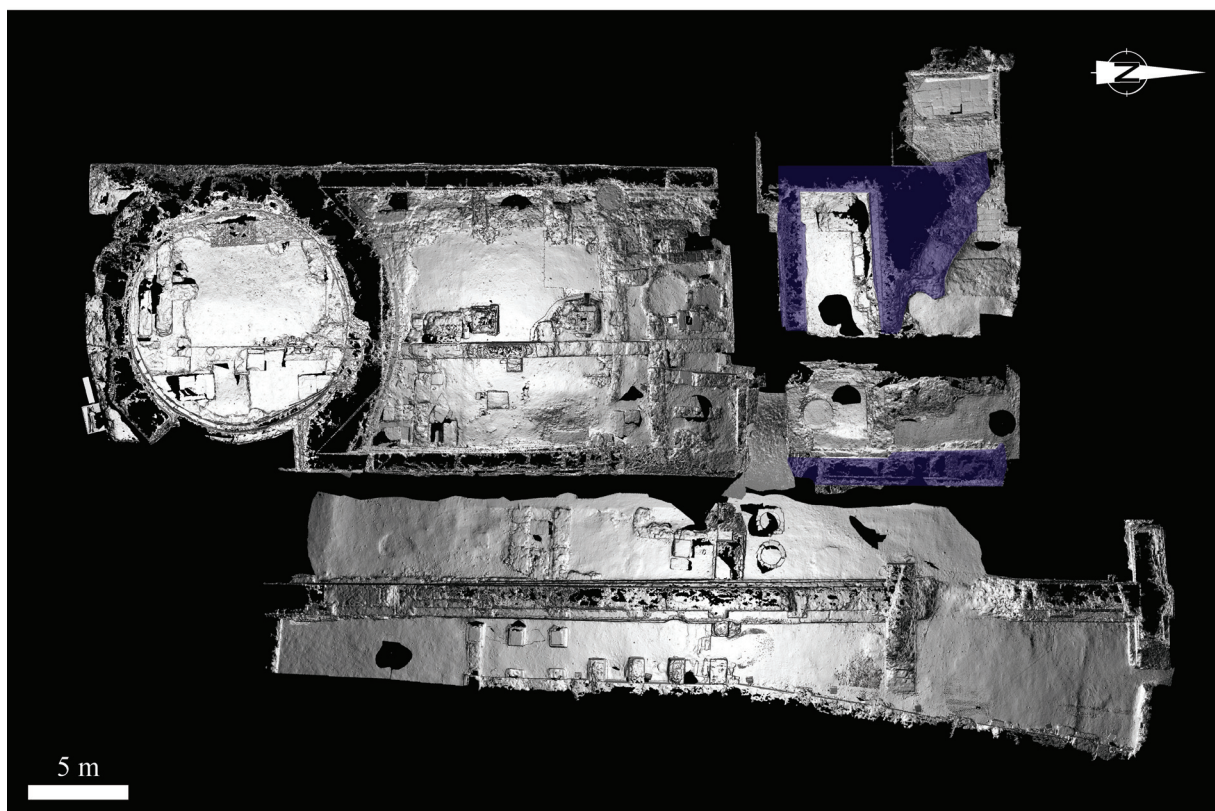


Abbildung 5.14: Erhaltene Bereiche des nördlichen Apsidensaales mit Vorraum der vierten Bauphase.

Vor dem südlichen Apsidensaal wird, analog zu den nördlichen Befunden, eine weitere Vorhalle vermutet (Precht, 1973). Diese liegt in Ihrer Position unmittelbar unter der Rathauslaube aus dem 16. Jahrhundert (Gechter und Schütte, 2000) und konnte bislang nicht vollständig ergraben werden. Zur Vorhalle des südlichen Apsidensaals werden neue Erkenntnisse durch die geplanten Grabungen erwartet.

Apsidensäle

Die Apsidensäle des Praetoriums bilden im Norden und Süden den Gebäudeabschluss. Im nördlichen Apsidensaal, der im Norden von der Mauer 103, im Süden von der Mauer 102, im

Osten von der Trennmauer zur Vorhalle 105b und im Westen von einer halbkreisförmigen Apsis begrenzt wird, setzt sich die trapezoide Raumform, die schon in der Vorhalle beobachtet werden konnte, fort. Auch hier sind die West-Ost verlaufenden Mauern nicht rechtwinklig an die Ostwand angeschlossen und verlaufen nicht parallel (Precht, 1973). Es zeigt sich, dass die Südwand 102 gegenüber der Nordwand verkürzt ist, um so zur Gesamtstruktur des Mittelbaus überzuleiten. Die Fundamente des nördlichen Apsidensaals sind durch massive Gussstrukturen gekennzeichnet, die meist Reste älterer Bauperioden mit einbeziehen. Aus den Resten der westlichen Apsis, die auf einem 2 m mächtigen Gussfundament (UK 46.0 m ü.NN) aufsitzen, lässt sich nach Precht (1973) ein Durchmesser von maximal 10.25 m rekonstruieren. In der nördlichen Wand die, wie die südliche, auf einem massiven Gussfundament gegründet ist, befindet sich mit der Nord-Süd verlaufenden Mauer 107 der Rest einer Apsideneinschnürung (Precht, 1973). Ein Äquivalent bestand nach Precht (1973) auch in der südlichen Mauer 102, wurde aber vermutlich durch mittelalterlichen Steinraub zerstört. Westlich schließt an die Außenseite der Apsis eine Mauer (102b) an, die zur Terrassenbebauung gehörte (Precht, 1973).

Vom nördlichen Apsidensaal sind im heutigen Museum nur noch die südwestlichen Reste der Apsis, Teile der südlichen Mauer 102 und der südliche Teil der Westwand 105b zu sehen. Die Reste des südlichen Apsidensaales wurden schon im 16. Jahrhundert beim Bau der Rathauslaube erstmals beschrieben (Höhlbaum, 1887) und bei Restaurierungsarbeiten im 19. Jahrhundert wieder entdeckt (Schulze und Steuernagel, 1895). Es dauerte allerdings bis zu den Grabungen 1953-1955, bis die Befunde erstmalig systematisch aufgenommen und interpretiert wurden (Doppelfeld, 1956; Precht, 1973). Der südliche Apsidensaal wird im Norden von Mauer 229/188 begrenzt, von der in den Grabungen nur die westliche Hälfte aufgefunden werden konnte. Den südlichen Abschluss des Saales bildet Mauer 352. Dieser auffallend geringmächtigen Mauer ist eine ältere Mauer 355 vorgesetzt, die im aufgehenden Mauerwerk vermutlich in den Bau integriert wurde (Precht, 1973). In der Gesamtsymmetrie des Gebäudes fällt auf, dass die Südwand des Apsidensaales nicht mit der südlichen Begrenzung der Rheinfront, die durch den Maueransatz 305 gegeben ist, abschließt, sondern zusammen mit dem Wandvorsprung 101d um 2.15 m nach Norden versetzt ist (Precht, 1973). Precht (1973) vermutet aufgrund von Fundamenten, die südlich der Wand 352 in der Flucht der Mauer 305 gefunden wurden, das ursprünglich in der ersten Bauphase IV,1 Erweiterungen nach Süden oder Nischen geplant waren. Diese wurden jedoch zugunsten der Symmetrie mit dem nördlichen Apsidensaal in der zweiten Bauphase IV,2 aufgegeben oder abgerissen. Die östliche Begrenzung zur Vorhalle des Saales konnte nicht gefunden werden. Im Westen wurden Reste der Südwestecke der Apsis gefunden aus denen sich ein Durchmesser von 10.04-10.30 m errechnen lässt. Dies entspricht grob den Abmessungen der nördlichen Apsis (Precht, 1973). Geringe Abweichungen erklärt Precht (1973) mit der besonderen trapezoiden Form des nördlichen Saales. An der Westseite setzten analog zum nördlichen Saal Gebäude zur Terrasse hin an (Precht, 1973). Im Inneren der Apsis setzten am Ostabschluss, analog zum nördlichen Bereich, zwei Nord-Süd verlaufende Vorsprünge an (353, 354), welche die Apsideneinschnürung bildeten (Precht, 1973). Die Fundamentierung des südlichen Apsidensaales war als Gussfundament ausgeführt, dessen Unterkante jedoch nicht ergraben wurde (Precht, 1973). Derzeit sind die oben genannten Befunden nicht zugänglich.

Octogon

Den baulichen Mittelpunkt des antiken Praetoriums bildet der zentrale Oktogonalbau. Der ehemals knapp 30 m hohe Saal (Gechter und Schütte, 2000) zeigt deutliche Bauwerksschäden (siehe Abschnitt SCHÄDEN), welche zu einer Deformation der ursprünglichen Form führen.

Der Grundriss des Gebäudes zeigt nach Außen die namensgebende oktagonale Form, während die Innenseite der Wand rund war. Durch die Deformationen zeigt sich heute eine Überlängung des Octogons in West-Ost Richtung. Precht (1973) gibt als Raumgröße pauschal 11.2 m in Nord-Süd-Richtung und 11.74 m an. Die Kartierung des Octogons mithilfe der 3D-Technik erlaubt eine erneute Vermessung des Octogons in verschiedenen Höhenlagen. Aus sieben Profilen, die von 46.47 m ü.NN bis 49.47 m ü.NN verteilt sind, ergibt sich eine Nord-Süd-Erstreckung von 10.69 – 11.28 m und eine West-Ost-Erstreckung von 10.97 – 11.84 m. Das Verhältnis zwischen West-Ost- und Nord-Süd-Erstreckung zeigt, das auch die Messungen von Precht (1973) im aktuellen Messbereich gelegen haben können, auch wenn Precht keine Höhenangaben für seine Messungen angibt. Die auffallende Streckenzunahme sowohl in Nord-Süd-Richtung als auch in West-Ost-Richtung ist durch die mit der Höhe abnehmenden Mauerwerksmächtigkeit sowie durch die massiven Gebäudeschäden (Schrägstellung des östlichen Bereiches), zu erklären (siehe unten). Precht (1973) vermutet eine Seitenlänge des Achtecks von 20 Fuß d.h. zwischen 5.92 m und 6.00 m, je nachdem welches Fußmaß zugrunde gelegt wird. Die Messungen auf Grundlage der 3D Punktwolke ergaben für die Nördliche Seite eine Kantenlänge von 6.26 m. Anhand der bestehenden Geometrie wurde die Länge der NW Seite mit 5.81 m, der W Seite mit 5.84 m, der SW Seite mit 6.37 m und der S Seite mit 6.18 m rekonstruiert. Im Mittel ergibt sich hieraus eine Kantenlänge von 6.09 m welche jedoch aufgrund der Deformation des Gebäudes zu groß sein dürfte. Über die Kantenlänge a lässt sich der Innenkreisradius r_i des zugrunde liegenden Achtecks berechnen:

$$r_i = \frac{a}{2} \cdot (1 + \sqrt{2}) \quad (5.1)$$

Zieht man nun vom Innenradius die ermittelten Wandstärken w ab erhält man den Innenradius des Saales r_{Saal} .

$$r_{Saal} = r_i - 2w \quad (5.2)$$

Für die von Precht (1973) vorgeschlagenen Kantenlängen von 5.92 m und 6.00 m ergibt sich mit der von ihm vorgeschlagenen mittleren Wandstärke von 1.5 m ein Innendurchmesser des Saales von 11.29 m bzw. 11.49 m. Die nordwestliche und die westliche Kante deuten auf eine kürzere durchschnittliche Kantenlänge hin. Nimmt man für die Kanten statt eines Maßes von 20 Fuß ein Maß von 19.5 capitolinischen Fuß, also 13 Ellen an, ergibt sich mit der aus den 3D Daten ermittelten mittleren Wandstärke von 1.55 m eine Saalweite von 11 m. Die Ungleichförmigkeit der erhaltenen und rekonstruierten Kanten deutet jedoch darauf hin, dass schon das undeformierte Gebäude kein symmetrisches Achteck bildete. Precht (1973) sieht die Gründe hierfür in ungenauer Ausführung der Wandstärken, Konstruktionsproblemen durch den komplexen Baugrund sowie in einem Versuch die Schiefwinkligkeit der restlichen Stadtbebauung auszugleichen.

Bei der Gründung des Octogons wurden teilweise ältere Gebäudereste in einen Fundamentring integriert, der aufgrund der Hanglage des Bauplatzes im Osten bis 42.7 m und im Westen bis 45.7 m herunterreicht. Im westlichen Bereich wurde ein 0.9 m mächtiges Bruchsteinfundament mit Mörtel nach Osten an die ältere Mauer 173 angesetzt (Precht, 1973). Zwischen den Mauern 173 und 158a/b (beide Nord-Süd verlaufend) ist das Fundament aus opus caementicium wesentlich tiefer gegründet (Precht, 1973). Im östlichen Bereich ist das Fundament aus opus cementicium um 0.6 m gegenüber dem zentralen Bereich abgesenkt,

wodurch sich eine getreppte Gesamtausführung des Fundamenttringes ergibt. Nach Precht (1973) wurden die Fundamente in offene, geböschte Gruben ohne Verschalungen gegossen. Auf dem Fundamentunterbau wurde ein Sockelmauerwerk aus Tuffspolien errichtet. Dieses gleicht bis auf eine Höhe von 48.0 m die Treppenform des Fundamentes aus (Precht, 1973), so dass im westlichen Teil zwei, im zentralen Teil vier und im östlichen Teil fünf Blocklagen zu finden sind. Auf diesen mächtigen Tuffquadern ($>0.5 \text{ m} \times ? \times 0.5 \text{ m}$) bilden sieben Reihen kleinere Tuffquader den Übergang zum polygonalen, aufgehenden Mauerwerk (Precht, 1973). Nach einem Absatz auf der inneren Mauerseite folgt das aufgehende Mauerwerk aus kleineren Tuffquadern mit einem Ziegelband, welches auch in der Nord-Südmauer 105b zu finden ist.

Im Inneren des Saales wurde bei den Ausgrabungen 1953 ein vermörteltes Quaderfundament gefunden (Doppelfeld, 1956). Auf diesem Fundament vermutet Precht (1973) ein Monument, während Bandmann (1965) den Saal als Thronsaal interpretiert und an dieser Stelle den Thron vermutet. Im heutigen Museum sind die Reste der Fundamente des Octogons mit den älteren Mauerbefunden, sowie Teile des aufgehenden Mauerwerkes zu sehen (Abb. 5.15). Die zentralen Fundamente sind nicht erhalten.

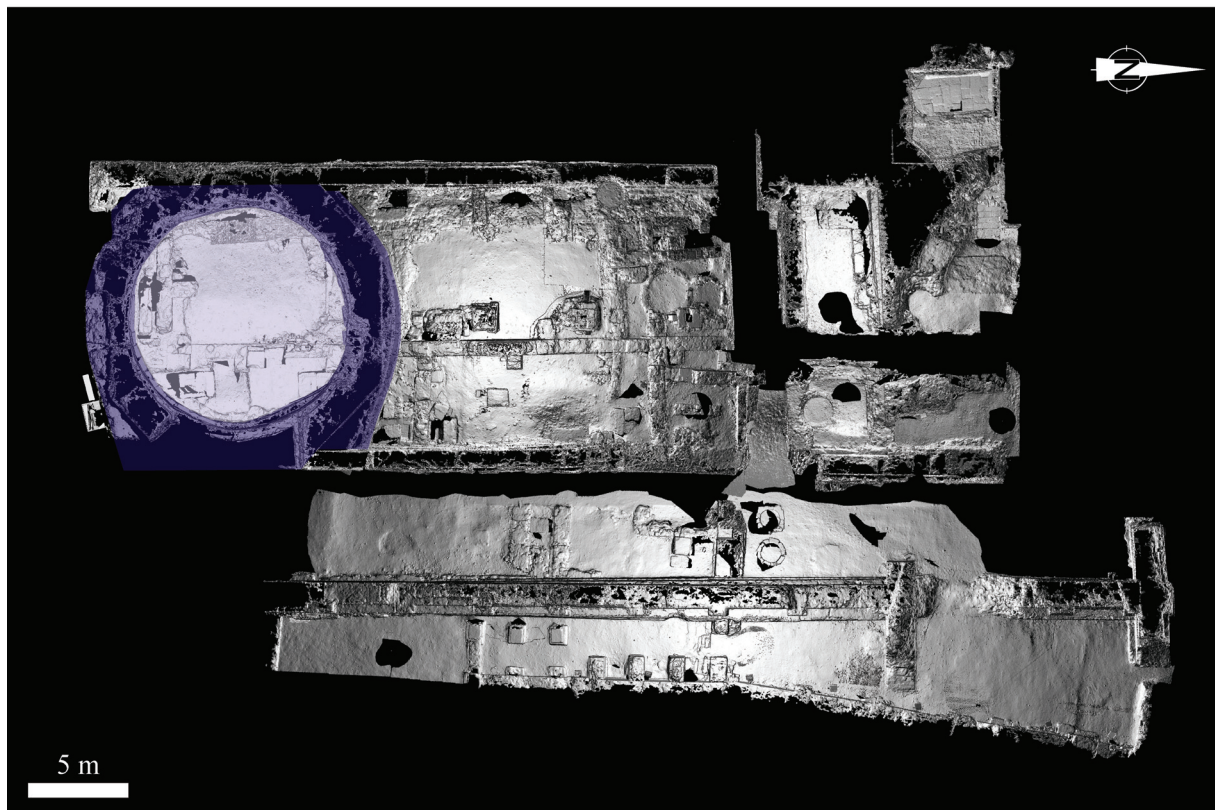


Abbildung 5.15: Erhaltene Bereiche des Octogons der vierten Bauphase.

Nördlicher Saal

Nördlich des Octogons bildet ein ca. 20 x 13 m großer Saal (Precht, 1973) den Hauptteil des nördlichen Gebäudeflügels (Abb. 5.16). Im Süden wird der Saal durch das, in den Raum ragende Achteck des Octogons begrenzt. Den Westabschluss bildet die über die gesamte Länge des Gebäudes zu verfolgende Rückwand 111. Im Osten schließt sich die Porticus Galerie mit ihrer westlichen Begrenzungswand 105b an. Der Nordabschluss wird von einem

Ost-West verlaufenden Korridor gebildet, der sich mit der Mauer 121 an den Saal anschließt (Abb. 5.16).

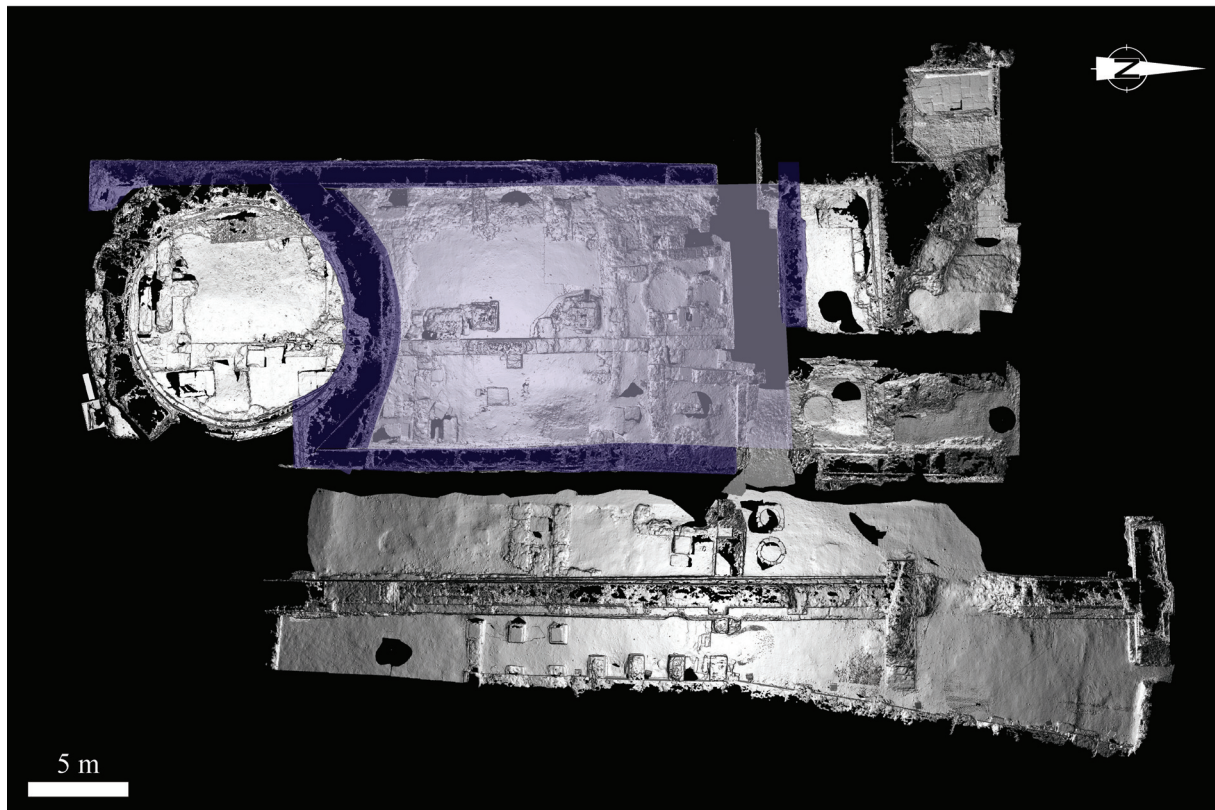


Abbildung 5.16: Erhaltener Bereich des nördlichen Saales der vierten Bauphase.

Das Gesamtgefüge des Saales zeigt keine internen Trennwände, so dass auf einen einheitlichen großen Raum geschlossen werden kann. In der zentralen Nord-Süd-Achse liegen drei ausgehöhlte Pfeileransätze (166a, b, c) die nach Doppelfeld (1956) ehemals Holzpfeiler aufgenommen haben, die eine Deckenkonstruktion stützten. Anders als Doppelfeld (1956) ordnet Precht (1973) diese Konstruktionen aufgrund ihrer tiefen Fundamentierung als spätantik ein. Die Fundamentierung zeigt, dass die Pfeiler für große Lasten ausgelegt waren, was auf eine zweistöckige Ausgestaltung des nördlichen Saals deutet. Die westliche Rückwand des Saales ist auf den Resten der ehemaligen Tonnengewölbe aus Bauperiode II, 2 errichtet worden. Bis auf die West-Ost verlaufenden Trennmauern der Gewölbe, welche überbaut wurden, wurden die Gewölbe komplett abgerissen. Direkt vor der neu errichteten Rückwand finden sich in einem Absatz noch die Reste der alten Mauer 173. Die Ostbegrenzung wird durch die Westwand der Porticus Galerie gebildet. Den Nordabschluss des Saales bildet die West-Ost verlaufende Mauer 121, an die sich im Norden ein kleiner Korridorraum (Precht, 1973) anschließt. Während der Erstergrabung konnte nachgewiesen werden, dass die Mauer den Saal auf kompletter Länge nach Norden begrenzte (Doppelfeld, 1956; Precht, 1973). Im Norden der Mauer befindet sich ein schmaler Korridor, der zwischen dem nördlichen Saal und dem nördlichen Apsidensaal eingeschoben ist. Der Korridor folgt der West-Ost Ausdehnung des nördlichen Saales und grenzt damit im Osten an die Porticus Galerie. Mit seiner trapezoiden Form folgt der Korridor der Form des nördlichen Apsidensaales. Diese Anpassung erfolgte wahrscheinlich nach Baubeginn dieses Abschnittes, da die West-Ost verlaufende Süd- (121) und Nordwand (102) gegenüber ihren Fundamenten nach Nordwesten verdreht sind (Precht, 1973).

Im heutigen Museumsbereich sind sowohl der nördliche Saal mit seinen Pfeileransätzen, als auch der nördlich anschließende Korridorbereich zu sehen (Abb. 5.16). Der östliche Teil des Korridors wurde während der Ausgrabung beschädigt und konnte nicht erhalten werden (Precht, 1973).

Südlicher Saal/Flügel

Südlich des Octogons schließt sich ein der Größe des nördlichen Saales entsprechender, Flügel an. Doppelfeld (1956) schließt auf einen zeitgleich mit dem nördlichen Saal errichteten Gebäudeteil, der jedoch durch verschiedene Mauern unterteilt war. Im Westen wird dieser Bereich ebenfalls durch die Rückwand 111 bzw. der entsprechenden Mauer 111a begrenzt. Von der Rückwand aus ziehen sich drei West-Ost verlaufende Trennwände (185, 186, 187) bis zur Nord-Süd verlaufenden Mauer 158b. Diese Mauer aus älterem Baubestand wurde in diesem Gebäudeabschnitt scheinbar zur internen Gliederung in verschiedene Räume weiterverwendet. Unklar ist ob sich diese Mauer bis zum südlichen Apsidensaal erstreckte (Precht, 1973). Zwischen den West-Ost verlaufenden Mauern 186 und 187 findet sich im Untergrund der Kanal 164, welcher im Osten aus der Rheinfassade austritt (Precht, 1973). Bei genauerer Betrachtung der Fundamente und der Anschlüsse an die umgebenden Mauern zeigt sich, dass sowohl Mauer 186 als auch Mauer 187 ihren Ursprung in der Bauperiode III haben (Precht, 1973). Östlich der Nord-Süd verlaufenden Mauer 158b findet sich nördlich des Wandanschlusses von Mauer 185 die West-Ost verlaufende Mauer 189, wodurch ein kleinerer Raum zum Octogon hin entsteht. Precht (1973) vermutet hier ebenfalls die Weiterverwendung älterer Mauern (Perioden III, 2).

Von den beschriebenen Befunden ist zurzeit keiner zugänglich. Unklar ist auch wie viele dieser Befunde bei den geplanten Grabungen wieder gefunden werden können, da weite Teile nach der Ausgrabung 1953, im Zuge der Neubebauung abgetragen wurden (Precht, 1973).

KARTIERUNG

Die zurzeit zugänglichen Reste des Praetoriums unter dem Neubau des Spanischen Baus zwischen Portalsgasse und Kleiner Budengasse gehören größtenteils der vierten Bauphase an. Während der Kartierung konnten zudem Reste der Bauphasen II und III dokumentiert werden.

Die Reste der Fundamente und Teile des aufgehenden Mauerwerkes wurden im Zeitraum von November 2008 bis März 2009 in 94 Einzelscans mit der in Kapitel 4.7.1 beschriebenen Methode kartiert (Abb. 5.17). Die Scans wurden auf zwei Höhenniveaus durchgeführt. Die Gesamtstruktur wurde durch Scans von den Besucherlaufwegen erfasst. Um die Abschattungen dieser Scans auszugleichen und Details der einzelnen Räume hinzufügen zu können wurden zudem Scans auf dem heutigen Bodenniveau in den einzelnen Gebäudeteilen durchgeführt.



Abbildung 5.17: Aufnahmestandorte der einzelnen Scans im Praetorium. Rot markierte Scans wurden vom erhöhten Niveau des heutigen Laufweges aufgenommen, grün markierte Scans wurden auf dem Niveau des heutigen Bodens aufgenommen.

Die Daten wurden gemäß Kapitel 4.7.2 gefiltert und bereinigt. Der mittlere Registrierungsfehler bei der Verknüpfung der einzelnen Punktwolken lag bei ± 0.00132 m. Die Georeferenzierung der Modelle erfolgte mit einem mittleren Fehler von ± 0.00433 m. Die Registrierfehler der einzelnen Punktwolken können der Tabelle im Anhang entnommen werden.

Aufgrund der enormen Datenmenge wurden die Scans in Untermodelle des Octogons, des nördlichen Saales, des nördlichen Apsidensaales und der Rheinfassade der Porticus Galerie unterteilt (Abb. 5.18).

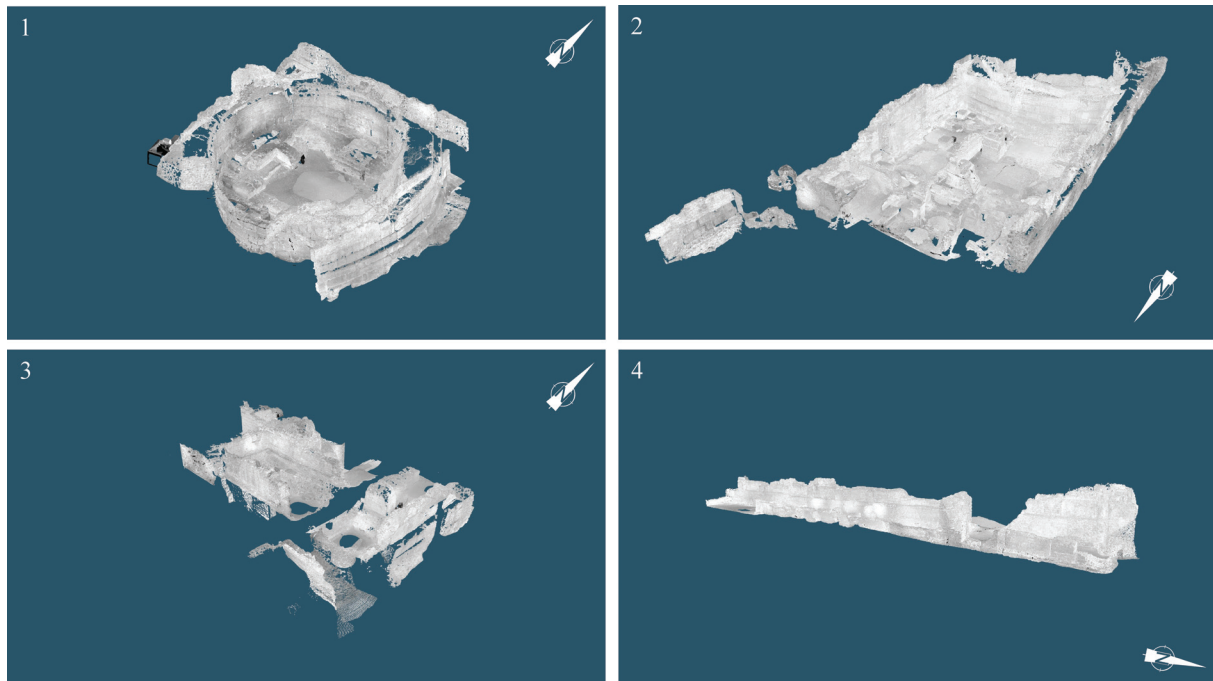


Abbildung 5.18: Untermodelle des 3D Modells des Praetoriums. (1) Octogon, (2) Nördlicher Saal, (3) Nördlicher Apsidensaal und (4) Rheinfront.

SCHÄDEN

Die Auswertung der 3D-Daten konnte für das Praetorium Schäden aus vier verschiedenen Schadensklassen nachweisen. Neben Schrägstellungen von Gebäudeteilen oder einzelnen Blöcken finden sich Risse, Versätze von Gebäudeteilen oder einzelnen Blöcken und anthropogen verursachte Schäden. Zur Quantifizierung der Neigungsschäden wurden über 160 virtuelle Schnitte in West-Ost- und Nord-Süd-Richtung durch die Punktwolken der Untermodelle gelegt. Im Octogon wurden zudem radial angeordnete Schnitte durch die runde bzw. oktagonale Struktur gelegt. Anhand der Daten der Schnitte wurden die Neigungen der angeschnittenen Gebäudeteile und Mauern bestimmt. Im Bereich des Raumes im Nordosten des nördlichen Saales wurden die Neigungen anhand von Orthophotos der Punktwolke vermessen. Insgesamt wurden 697 Neigungswerte bestimmt. Von diesen Werten zeigen 89 eine Neigung nach Norden, 428 eine Neigung nach Osten, 98 eine Neigung nach Süden und 82 eine Neigung nach Westen. Die Neigungswerte betragen nach Norden im Mittel $1.44^\circ \pm 1.11^\circ$, nach Osten $3.09^\circ \pm 2.42^\circ$, nach Süden $1.39^\circ \pm 1.42^\circ$ und nach Westen $1.49^\circ \pm 1.80^\circ$. Die maximalen Neigungen die festgestellt werden konnten liegen bei 5.56° nach Norden, 15.04° nach Osten, 11.42° nach Süden sowie 12.85° nach Westen. Betrachtet man die verschiedenen Teilbereiche des Praetoriums zeigen alle Bereiche die stärkste

Neigung in Richtung Osten. Im Bereich des nördlichen Saals ist die Differenz zu den Werten für die anderen Richtungen jedoch wesentlich geringer als in den anderen Bereichen. Die Abweichung in diesem Teilbereich lässt sich mit der Tatsache begründen, dass hier die meisten West-Ost verlaufenden Strukturen liegen und daher auch vermehrt Neigungen in Nord-Süd Richtung festgestellt werden konnten. Abbildung 5.19 zeigt die Verteilung der Neigungen auf einem Grundriss des Praetoriums. Tabelle 5.2 fasst die Ergebnisse für den gesamten Bereich des Praetoriums sowie für die einzelnen Teilbereiche zusammen.

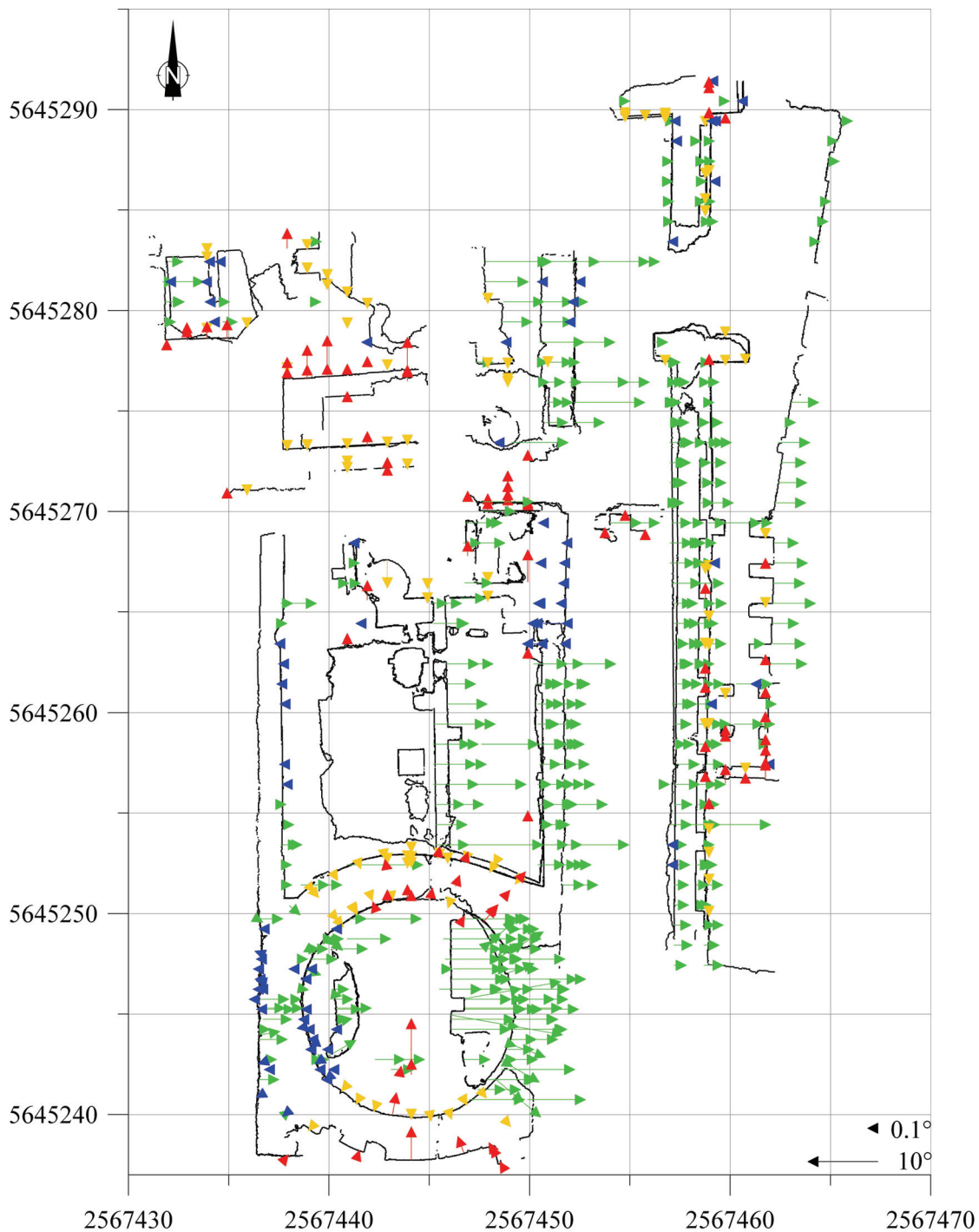


Abbildung 5.19: Darstellung der Neigungen im Praetorium. Die Richtung der Vektoren zeigt die Neigungsrichtung, die Länge der Vektoren zeigt den Betrag der Neigung. Die Vektoren sind farblich nach den Himmelsrichtungen unterschieden (rot: $>315^\circ$ - $<45^\circ$, grün: $>45^\circ$ - $<135^\circ$, gelb: $>135^\circ$ - $<225^\circ$, blau: $>225^\circ$ - $<315^\circ$).

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Neigungsmessungen aus dem Praetorium für den Gesamtbereich und die Teilbereiche.

| Gesamt | Max (°) | Min (°) | Durchschnitt (°) | Standardabweichung (°) |
|--------------|---------|---------|------------------|------------------------|
| N | 5.56 | 0.11 | 1.44 | 1.11 |
| E | 15.04 | 0.00 | 3.09 | 2.42 |
| S | 11.42 | 0.01 | 1.39 | 1.42 |
| W | 12.85 | 0.01 | 1.49 | 1.80 |
| Octogon | Max (°) | Min (°) | Durchschnitt (°) | Standardabweichung (°) |
| N | 5.56 | 0.14 | 1.41 | 1.35 |
| E | 10.21 | 0.00 | 4.02 | 2.62 |
| S | 3.95 | 0.01 | 1.48 | 1.14 |
| W | 3.09 | 0.07 | 1.37 | 0.98 |
| Nördl. Saal | Max (°) | Min (°) | Durchschnitt (°) | Standardabweichung (°) |
| N | 3.99 | 0.83 | 1.97 | 0.86 |
| E | 15.04 | 0.38 | 3.64 | 2.49 |
| S | 11.42 | 0.23 | 2.93 | 3.32 |
| W | 12.85 | 0.17 | 2.37 | 2.87 |
| Nördl. Apsis | Max (°) | Min (°) | Durchschnitt (°) | Standardabweichung (°) |
| N | 5.11 | 0.13 | 1.49 | 1.33 |
| E | 13.67 | 0.27 | 3.67 | 3.16 |
| S | 4.81 | 0.20 | 1.30 | 1.14 |
| W | 3.77 | 0.27 | 1.43 | 1.19 |
| Porticus | Max (°) | Min (°) | Durchschnitt (°) | Standardabweichung (°) |
| N | 2.72 | 0.11 | 1.16 | 0.75 |
| E | 8.06 | 0.05 | 1.90 | 1.28 |
| S | 2.03 | 0.08 | 0.95 | 0.51 |
| W | 3.75 | 0.03 | 0.53 | 0.93 |

Abbildung 5.19 zeigt, dass die Neigungswerte Richtung Osten in der östlichen Hälfte des Gebäudes in Anzahl und Betrag häufiger werden. Im Untergrund korrespondiert dies mit dem Verlauf des natürlichen Hanges. Der östliche Teil des Gebäudes wurde über die natürliche Hangkante hinaus nach Osten gebaut und in diesem Bereich in künstlichen Auffüllungen gegründet. Das Schadensbild deutet auf eine vertikale oder hangabwärtige Bewegung, die über den kompletten Bereich Schrägstellungen verursacht hat. Eine Volumenberechnung anhand der Schrägstellung des Octogons zeigt, dass ein Keil mit einem Volumen von ca. 20 m³ im Untergrund ausreicht, um die Schrägstellungen auszugleichen. Im Umkehrschluss zeigt dies, dass schon relativ geringe Materialmengen ausreichen, die mobilisiert werden müssen, um derartige Neigungen zu erzeugen.

Im gesamten Bereich des Praetoriums gibt es keinerlei Anzeichen für Reparaturversuche. Dies deutet auf ein plötzliches Ereignis hin, das keine Möglichkeit zur Reparatur ließ.

Bei einer angenommenen Höhe von 28 m über der Fundamentunterkante bei ca. 42 m ergibt sich über die mittleren Neigungen im Octogon von ca. 4° eine Öffnungsweite am Dach von 1.84 m. Wird der maximale im Octogon bestimmte Betrag von 10.21° angenommen, ergibt sich eine Öffnungsweite von 4.31 m. Hinzen und Schütte (2003) haben die gleichen Annahmen auf Grundlage der archäologischen Daten durchgeführt und kamen zu einer Öffnungsweite von 1.6-1.8 m. Diese Öffnungsbeträge können nur zu einem Zusammensturz des Gebäudes geführt haben. Abbildung 5.20 zeigt die Rekonstruktion der Öffnungsweiten

für eine ursprüngliche Höhe von 28 m über der Fundamentunterkante bis zum Beginn der Dachkonstruktion.

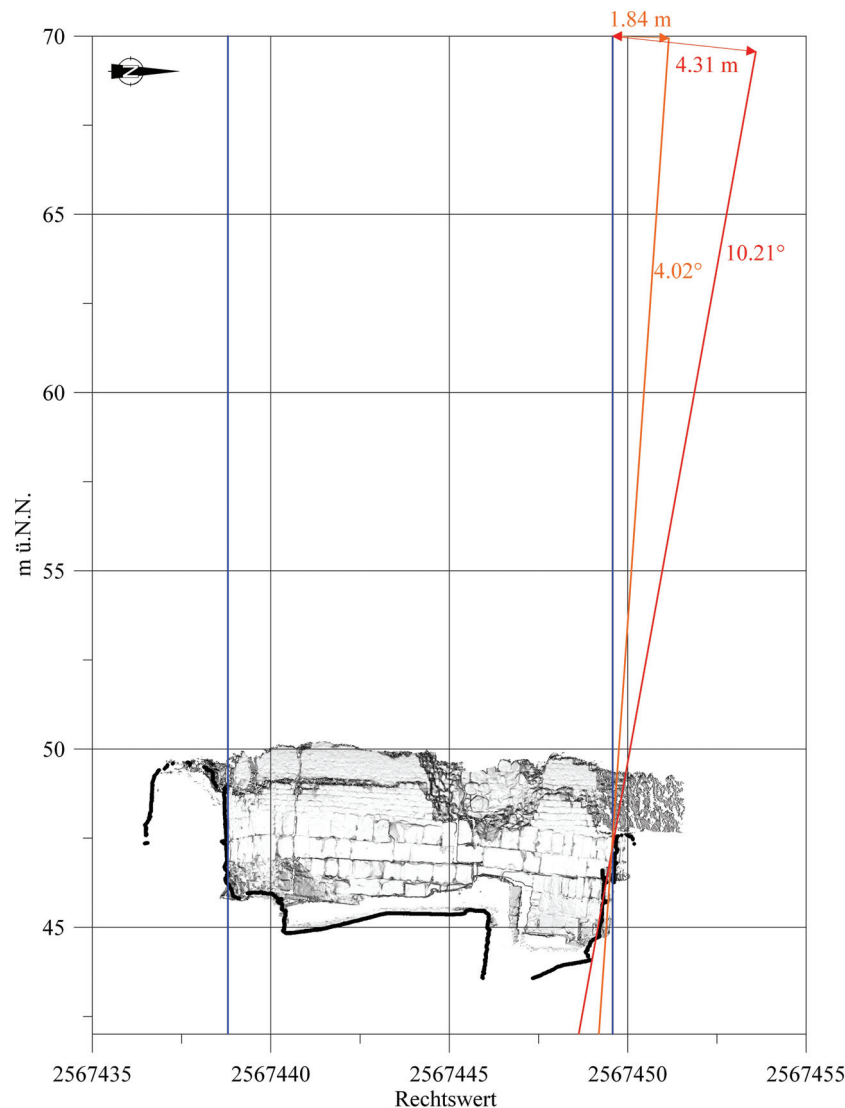


Abbildung 5.20: Rekonstruktion der Öffnungsweiten am Dach eines 28 m hohen Oktogons, bei Schrägstellung der östlichen Wand um 4.02° (orange) bzw. 10.21° (rot). Die blauen Linien zeigen die Vertikale. Im Hintergrund liegt die 3D Punktwolke der nördlichen Hälfte des Oktogons.

Neben den Neigungsschäden wurden im Praetorium 102 Risse und Brüche kartiert. Als Risse bzw. Brüche wurden Strukturen angesprochen, bei denen ehemals zusammenhängende Blöcke im Verlauf der Struktur durchtrennt wurden. Beschränken sich Öffnungen auf Fugenbereiche wurden diese der Kategorie „Horizontaler Versatz“ zugeordnet. Die Risse im Praetorium zeigen Öffnungsweiten von maximal 355 mm. Im Durchschnitt liegen die Rissweiten bei $183 \text{ mm} \pm 112 \text{ mm}$. Nicht ausgeschlossen werden kann, dass Risse und Brüche mit sehr geringen Öffnungsweiten, insbesondere Haarrisse bei der Kartierung nicht aufgelöst wurden. Signifikante Risse konnten jedoch auf Grundlage der 3D Daten erfasst werden. Abbildung 5.21 zeigt neben der Verteilung von horizontalen Versätzen und Schäden anthropogenen Ursprungs, die Verteilung der Risse im Praetorium. Hierbei fallen hohe Konzentrationen im Bereich des Oktogons, der nordöstlichen Ecke des nördlichen Saales sowie in zwei Bereichen der ehemaligen Frontmauer auf. Im Octogon treten die Risse korrespondierend zu Widerlagern im Untergrund auf, an denen das sich neigende Octogon

gebrochen ist. In der nordöstlichen Ecke des nördlichen Saales treten die Risse korrespondierend zu gegenläufigen Neigungen der westlichen Porticuswand und der West-Ost verlaufenden Mauern 125 und 126 auf (siehe Abb. 5.19). Hinzu kommt in diesem Bereich die Einwirkung einer schon 1973 beschriebenen Streubombe aus dem zweiten Weltkrieg (Abb. 5.21).

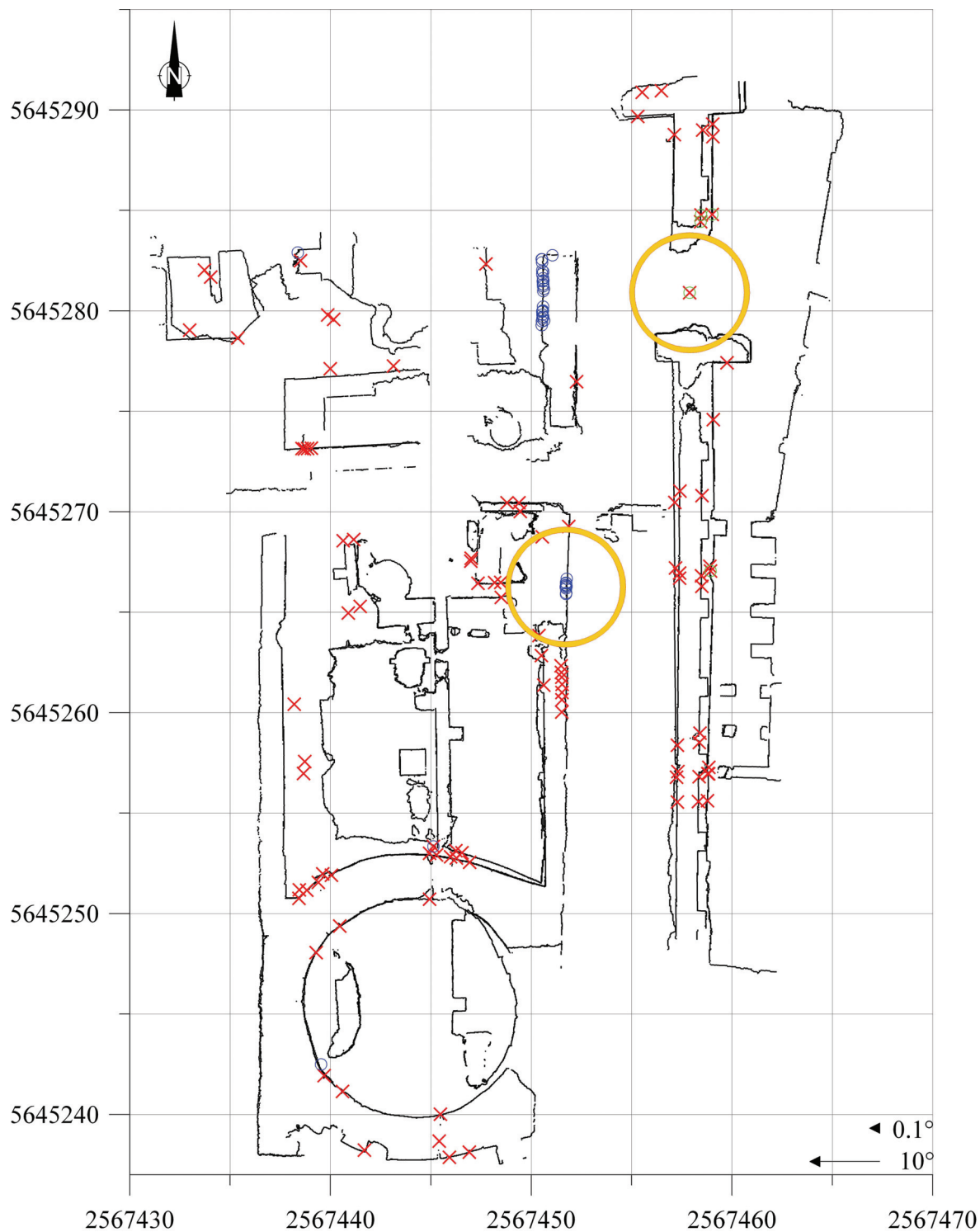


Abbildung 5.21: Verteilung der Schadensklassen Bruch/Rissschäden (rote Kreuze), horizontale Versätze (blaue Kreise) und anthropogenen Schäden (grüne Kreise). Die gelben Kreise markieren Bereiche die nachweislich im 2. Weltkrieg von Bomben getroffen wurden.

Vermutlich folgten die Neigungen in diesem Abschnitt ursprünglich dem generellen Neigungstrend nach Osten, wobei auch die Risse in den West-Ost verlaufenden Mauern entstanden sind. Durch den direkten Bombentreffer auf die Nord-Süd verlaufende Mauer 105b kam es zu einer Umkehr der Neigungsrichtung sowie zu zusätzlichen Rissen und horizontalen Versätzen in dieser Mauer.

An der Rheinfassade des Praetoriums konzentrieren sich die Risse zum einen auf den Bereich eines massiven Risses über dem angesprochenen Fundamentwechsel und zum anderen auf den benachbarten Bereich des Bombentreffers in Mauer 105b. Die Risse über dem Fundamentwechsel hängen unmittelbar mit dem unterschiedlichen Verhalten des nördlichen und des südlichen Fundamentabschnittes bei einer Bewegung im Untergrund zusammen. Die Risse in unmittelbarer Nachbarschaft zu dem angesprochenen Bombentreffer können nicht direkt einem anthropogenen Ursprung zugeordnet werden, ihre Lage legt dies jedoch nahe.

Ein weiterer Bombentreffer ist für den nördlichen Bereich der Rheinfassade belegt. In diesem Bereich wurde auf einer Länge von knapp 5 m die gesamte Frontmauer herausgesprengt. In unmittelbarer Nähe zu dieser trichterförmigen Aussprengung finden sich Risse, die auf die Sprengwirkung zurückzuführen sind.

Die Beträge, Koordinaten etc. der einzelnen Schadensbefunde können der Schadensdatenbank entnommen werden, die als Datei auf einer CD dem Anhang dieser Arbeit beiliegt.

5.2.2 Abwasserkanal

EINLEITUNG

Der in diesem Kapitel beschriebene römische Abwasserkanal ist Teil des komplexen Entwässerungssystems, das schon im 1. Jahrhundert n. Chr., im Zuge der römischen Stadtbesiedlung etabliert wurde (Schütte und Gechter, 2011). Der Abwasserkanal ist einer der Hauptsammler, über die Abwässer nach Osten in den Rhein geleitet wurden (Doppelfeld, 1979). Neben dem hier beschriebenen Kanal unter der „Kleinen Budengasse“, wurde ein weiterer in Höhe der heutigen Strasse „Obenmarspforten“ im südlichen Bereich der Archäologischen Zone gefunden. Über die Gesamtanzahl dieser Hauptsammler im Stadtgebiet gibt es in der Literatur unterschiedliche Angaben. Doppelfeld (1979) nennt drei Hauptsammler, während Hellenkemper (1986) von mindestens zehn ausgeht. Diese Schwankungsbreite der Angaben kann jedoch auf die unterschiedliche Definition von Haupt- und Nebensammlern der Autoren zurückzuführen sein. Unstrittig ist jedoch, dass große Wassermengen abgeführt werden mussten. Neben dem Wasser welches über die Wasserleitungen zunächst aus dem Vorgebirge, dann aus der Eifel, nach Köln gelangte musste Niederschlagswasser, das im Stadtgebiet nur unzureichend versickern konnten abgeleitet werden (Doppelfeld, 1979; Hellenkemper, 1986). Die Wasserleitung aus dem Vorgebirge hatte eine maximale Zuflusskapazität von ca. 7500 m³ am Tag, während die Eifelleitung ab Ende des ersten Jahrhunderts bereits eine Kapazität von maximal ca. 21000 m³ am Tag hatte (Brinker, 1986). Geht man von der von Doppelfeld (1979) angeführten Stadtfläche von 96,8 ha aus und berücksichtigt, dass in Köln in den Sommermonaten jedes Jahr mehrmals Tagesniederschlagsmengen von 20-30 mm auftreten (DWD, 2011) können zu dem abgeleiteten Frisch- und Brauchwasser noch einmal 20000-30000 m³ Niederschlagswasser gerechnet werden, die durch das Entwässerungssystem abgeführt werden mussten.

Der Kanal ist heute durch das Museum an der „Kleinen Budengasse“ zugänglich und kann auf knapp 115 m begangen werden. Im weiteren Verlauf der Ausgrabungen in der Archäologischen Zone, soll der Kanal bis zu seinem östlichen Austritt durch die Stadtmauer zugänglich gemacht werden. Bislang ist lediglich ein Teil dieses Abschnittes ergraben. Dieser östliche Teil ist jedoch nicht für den Publikumsverkehr zugänglich.

BAUGESCHICHTE

Der römische Abwasserkanal lässt sich zeitlich in zwei Bauabschnitte gliedern. Der westliche Abschnitt ist aus großen Tuffblöcken zusammengesetzt, die ursprünglich ein Gewölbe mit idealer Bogenform bildeten. Im Osten schließt sich über eine Baufuge eine Verlängerung mit Zementgewölbe bis zum Auslass durch die Stadtmauer an. Dieser Abschnitt wurde vermutlich zu einem späteren Zeitpunkt, nach Gründung der Kolonie angefügt (Schütte und Gechter, 2011). Der westliche Abschnitt ist schon seit dem 19. Jahrhundert bekannt und wurde post-römisch in Abschnitten als Keller genutzt (Schütte und Gechter, 2011). Zahlreiche Störungen und Einbauten belegen die sekundäre Nutzung des Sammlers. 1979 wurde in der Strasse „Unter Goldschmied“ ein moderner Abwasserkanal verlegt. In Zuge dieser Bauarbeiten wurde ein knapp 5 m langer Abschnitt des römischen Kanals entnommen, der heute als Exponat auf dem Theo-Burauen Platz steht (Wolff, 2000). Im römischen Kanal wird der moderne Kanal mit einem Treppeneinbau überbrückt. Im östlichen Abschnitt finden sich, besonders im Bereich des Auslasses durch die Stadtmauer, Spuren von mittelalterlichen Kellereinbauten. Im östlichen Abschnitt konnte bei Grabungen im Jahr 2009 ein Teilbereich mit anthropogen

ungestörten römischen Sedimenten freigelegt werden (Schütte und Gechter, 2011). Die Sedimente lagerten sich im Zeitraum nach der Aufgabe der römischen Eifelwasserleitung im letzten Viertel des 4. Jahrhunderts ab. Die Datierung wurde anhand von Weizenkörnern im Sedimentbefund mittels ^{14}C durchgeführt (Schütte und Gechter, 2011). Grewe (1986) nennt als Datum für die Zerstörung der Eifelwasserleitung nach ca. 200 jähriger Nutzung, die Eroberung von Köln durch die Franken um 355/356 n. Chr..

BAUBESCHREIBUNG

Die zeitliche Zweiteilung des Baus zeigt sich vor allem in der Bausubstanz. Der westliche Teil bis zur Baufuge ist zum größten Teil aus massiven Tuffblöcken aufgebaut, welche im Gewölbe mörtellos verbaut wurden. Zu den Seiten bilden vier bis fünf Blöcke die Gewölbeschultern, auf denen ein Gewölbe aus fünf bis sieben Blöcken ruht. Neben massiven Tuffblöcken wurden auch immer wieder Spolien verwendet. An einigen Blöcken sind Rinnen und Aussparungen zu sehen, die auf den ursprünglichen Verwendungszweck hindeuten. Der Boden wird von massiven Kalksteinplatten von bis zu 0,4 m Mächtigkeit gebildet, welche bis unter die Seitenwände reichen. Die Höhe des Abwasserkanals schwankt von 1.8m am niedrigsten Punkt im westlichen Drittel bis zu 2.5m im östlichen Bereich. Der westliche Bereich ist durch einen modernen Zugangstunnel vom Museum an der „Kleinen Budengasse“ aus zu erreichen. Das westliche Ende des Kanals ist durch eine rezente Ziegelmauer verschlossen. Im Osten begrenzt ein Metallgitter den ca. 115m langen zugänglichen Bereich. Der westliche Abschnitt zeigt einen Höhenunterschied von einem Meter auf einer Strecke von 112.5m. Daraus ergibt sich ein Gefälle von 0.89% (0.51°).

Im östlichen Bereich des Kanals wird der Boden ebenfalls von massiven Kalksteinplatten gebildet, die jedoch teilweise, vermutlich schon im Mittelalter heraus gebrochen wurden. Neben der insgesamt geringeren Höhe (bis 1.8m) unterscheidet sich der östliche Bereich durch sein gegossenes Gewölbe. In diesem Abschnitt wurde über einer Verschalung, deren Abdrücke teilweise noch sichtbar sind, opus caementicium mit Grauwackebruchstücken zum Guss eines Gewölbes verwendet. Die Gewölbeschultern werden von massiven Tuffquadern gebildet. Das Gefälle konnte aufgrund des ungenügend ergrabenen Bodenbereiches zum Zeitpunkt der Scans nur grob mit 0.69%-1.15% (0.4°-0.66°) bestimmt werden. Die Planung im Zuge des Projektes „Archäologische Zone Köln/Jüdisches Museum“ sieht vor dieses Teilstück mit dem bereits ergrabenen Bereich zu verbinden.

Der hier nicht näher beschriebene Kanal im Süden der Archäologischen Zone, an der Straße Obermarspforten, zeigt Gewölbeschultern aus Grauwackequadern, während sowohl das Gewölbe als auch die Kanalsohle ausgeräumt wurden und nicht mehr erhalten sind.

KARTIERUNG

Der westliche Abschnitt des Kanals konnte mit 26 Scans kartiert werden, während im östlichen Bereich nur vier Scans in einer provisorischen Scankampagne durchgeführt werden konnten. Die größte Herausforderung bei der Kartierung des westlichen Bereiches war die schmale (~1.2–1.3 m), lang gestreckte Form. Um Abschattungseffekte sowie schlechte Datenqualität aufgrund spitzer Auftreffwinkel des Laserstrahles auf die Wand zu vermeiden wurde der Abstand zwischen den einzelnen Scans mit ca. 5 m relativ klein gewählt (Abb. 5.22).

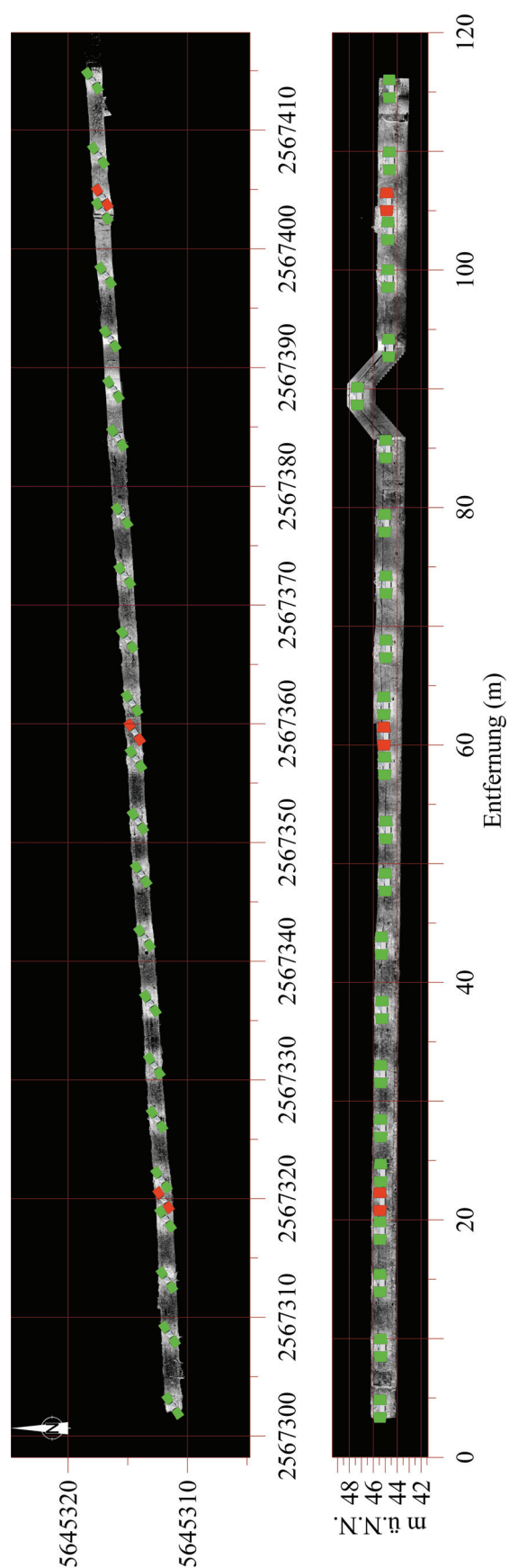


Abbildung 5.22: Standorte des 3D Laserscanners im westlichen Bereich des Abwasserkanals in Aufsicht (links) und Ansicht von Südwesten. Die roten Markierungen kennzeichnen die nachträglich aufgenommenen Scans zur Georeferenzierung.

Trotz des geringen Abstandes führt die lang gestreckte Form des Kanals und die dadurch resultierende geringe Überschneidung der Punktwolken zu einem größeren durchschnittlichen Registrierfehler ($\Delta=0.00144$ m) als in anderen Bereichen der Archäologischen Zone. Die Registrierfehler der einzelnen Punktwolken können der Tabelle im Anhang entnommen werden. In einigen niedrigen Bereichen musste bei der Aufnahme darauf geachtet werden, den Scanner nicht nur horizontal, sondern auch vertikal zentriert im Kanal aufzubauen um den geforderten Mindestabstand von 0.6 m in alle Richtungen einzuhalten.

Wie auch das Praetorium konnte der Abwasserkanal nur außerhalb der Museumsöffnungszeiten vermessen werden. Da zu Beginn der Arbeiten im Abwasserkanal keine Vermessungspunkte vorlagen, wurden zunächst 23 Scans zur Erfassung der Gesamtkonstruktion durchgeführt. Zu einem späteren Zeitpunkt wurden die nun vorhandenen Vermessungspunkte mit modifizierten Vermessungsspiegeln ausgestattet und mit drei zusätzlichen Scans erfasst. Diese Scans wurden nachträglich mit der bestehenden Punktwolke verknüpft und das Gesamtmodell wurde mit einem mittleren Fehler von 0.0046 m georeferenziert.

Der östliche Abschnitt des Abwasserkanals wurde 2009 in Kooperation mit den Kölner Verkehrsbetrieben von Osten ausgehend ergraben. Der Zugang zu dieser Grabung erfolgte über eine Öffnung der Strasse „Kleine Budengasse“. Diese Zugangsbaustelle führte zu einem sehr engen Zeitplan, da die Baustelle rechtzeitig vor der Eröffnung des Karnevals und vor dem Beginn der Kölner Weihnachtsmärkte 2009, aufgrund der großen Menschenmengen geschlossen werden musste. Während der Grabung wurden strukturelle Schäden deutlich, wodurch der Einsatz von Abstützvorrichtungen nötig wurde. Der Bereich konnte mit vier Einzelscans (Abb. 5.23) in einer provisorischen Scankampagne in wenigen Stunden erfasst werden. Bei der Kartierung dieses ca. 40 m langen Abschnittes wurden nur die westlichen Bereiche erfasst. In diesem Bereich sind die Bodenplatten nicht entfernt worden.

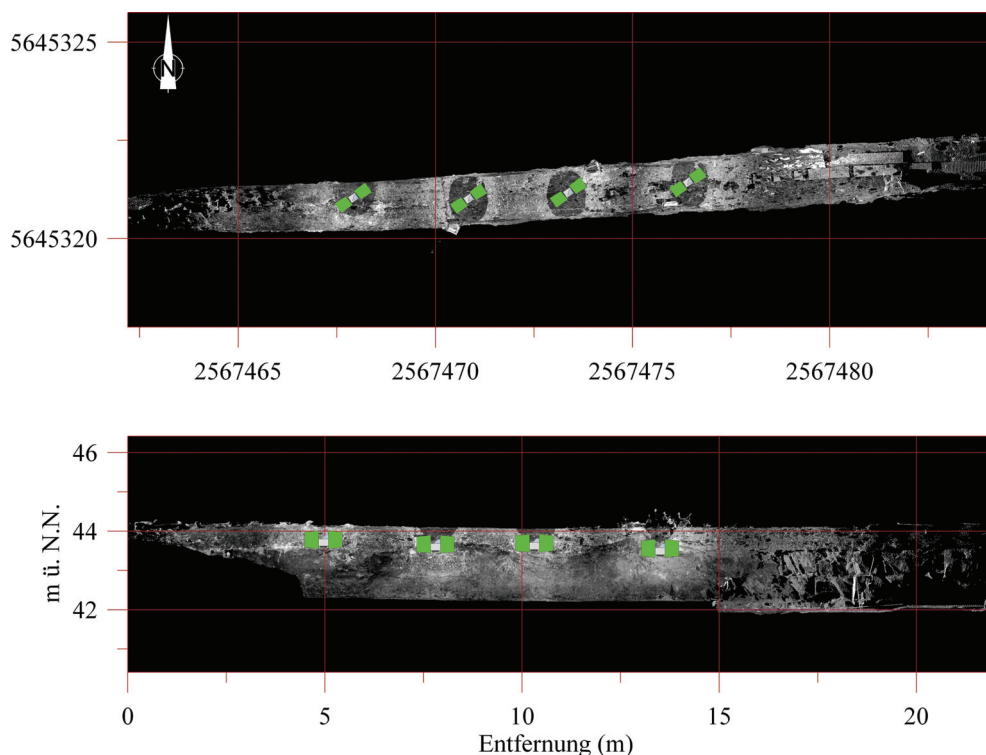


Abbildung 5.23: Standorte des 3D Laserscanners im östlichen Bereich des Abwasserkanals in Aufsicht (oben) und Ansicht von Südwesten (unten).

Da der Zeitrahmen für die Grabung sehr eng gesteckt war und zudem eine externe Firma beteiligt war, konnten die Grabungsarbeiten nur für einen kurzen Zeitraum unterbrochen werden. Zum Zeitpunkt der Aufnahme lagen keine Vermessungspunkte für diesen Abschnitt vor, so dass keine direkte Georeferenzierung möglich war. Zur Darstellung des Gesamtmodells wurde dieser Abschnitt manuell entlang der Achse des georeferenzierten, westlichen Abschnittes ausgerichtet.

Die größte Herausforderung bei der Vermessung des östlichen Abschnittes war neben dem Zeitdruck und den schwierigen Arbeitsbedingungen auf einer aktiven Baustelle, erneut die Form des Kanals. Im östlichen Bereich verringert sich im Vergleich zum westlichen Abschnitt noch einmal die Deckenhöhe. Zudem waren zum Zeitpunkt der Vermessung die Sedimente des Kanals noch nicht vollständig entfernt, was zu einer weiteren Einengung des Arbeitsraumes führte. Es ist geplant den Zugang des östlichen Abschnittes erneut zu öffnen und eine Verbindung zum bereits ergrabenen, westlichen Teil herzustellen. Im Zuge dieser Bau- und Grabungsmaßnahmen besteht vermutlich die Möglichkeit zu weiteren Laserscans.

SCHÄDEN

Im Abwasserkanal konnten zwei verschiedene Schadensarten nachgewiesen werden. Im Deckenbereich des westlichen Kanalabschnittes zeigen sich vertikale Versätze zwischen den einzelnen Blöcken des Gewölbes. Meist sind die Blöcke in unmittelbarer Nachbarschaft zum Schlussstein in der Mitte des Gewölbes nach unten versetzt. Neben diesen Schäden finden sich über die gesamte Kanallänge verteilt Abplatzungen an den Gewölbeschultern. Diese Abplatzungen konnten jedoch nur eingeschränkt untersucht werden, da weder im westlichen Abschnitt noch während der provisorischen Kampagne im östlichen Bereich die Gegenstücke zu den Abplatzungen gefunden werden konnten bzw. diese nicht zugänglich waren. Abbildung 5.24 zeigt die im Abwasserkanal beobachteten Schäden.

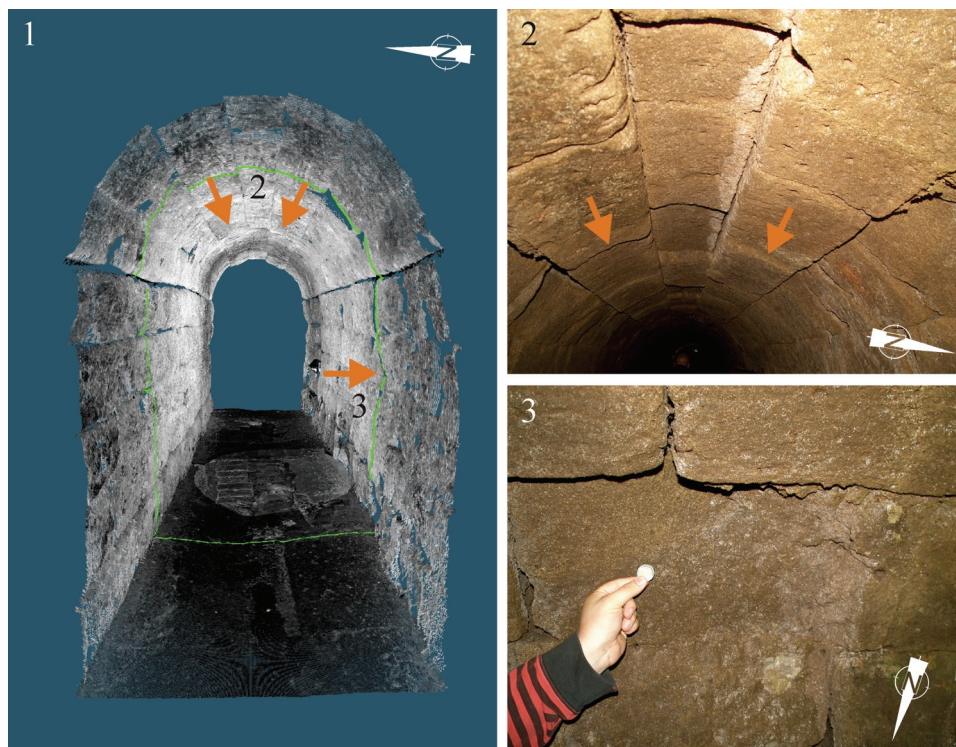


Abbildung 5.24: Übersicht über die Schäden im westlichen Kanalabschnitt. (1) zeigt das 3D Modell des Kanals mit den verschiedenen Schäden. (2) und (3) zeigen Detailaufnahmen der Versätze (2) und der Abplatzungen (3).

Im östlichen Abschnitt konnte, neben den Abplatzungen, ein Bruchschaden in der Gewölbedecke kartiert werden. Das hier in opus caementicium ausgeführte Gewölbe ist auf einer Länge von mindestens 14 m in der Längsrichtung des Kanals gerissen (Abb. 5.25).

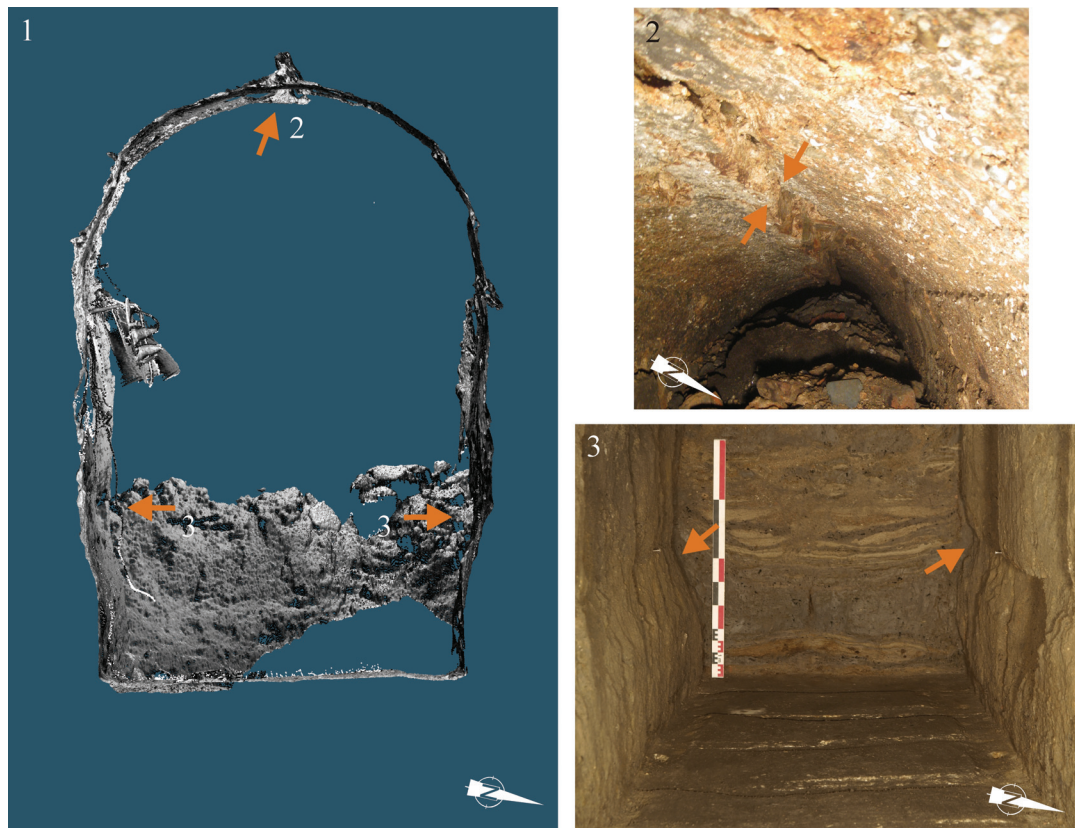


Abbildung 5.25: Übersicht über die Schäden im östlichen Kanalabschnitt. (1) zeigt das 3D Modell des Kanals mit den beobachteten Schäden. (2) und (3) zeigen Detailaufnahmen des Risses in der Decke (2) und der Abplatzungen (3) (Photos: (2) Hinzen, 2009; (3) Archäologische Zone Köln, 2009).

Zur Quantifizierung der Schäden im westlichen Abschnitt wurden Querschnitte im Abstand von 5 m durch den Kanal angefertigt. Für diese Querschnitte wurde mit der in Kapitel 4.8 vorgestellten Methode, die Abweichung von der idealen Form an dieser Stelle des Kanals berechnet. Für die Konstruktion der idealen Form wurden zunächst die mittleren Abstände der Seitenwände ermittelt. Auf diese wurde dann ein „idealer Bogen“ gesetzt, d.h. ein Halbkreis. Nun konnten Bereiche der Querschnitte bestimmt werden, die innerhalb bzw. außerhalb dieser idealen Form lagen. Über die Bestimmung der Flächen dieser Bereiche konnte die Deformation des untersuchten Querschnittes erfasst werden. Bei der Auswertung von 24 Querschnitten im westlichen Abschnitt des Kanals zeigte sich, dass im Mittel $6.4 \% \pm 2.8\%$ der Fläche der Querschnitte außerhalb oder innerhalb der idealen Form lag. Um sicherzustellen, dass keine Fehler über Unregelmäßigkeiten in den Seitenwänden erzeugt werden wurde die Berechnung für den obersten Meter des Kanals wiederholt, um nur den Gewölbebereich zu erfassen. Das Ergebnis zeigt, dass hierbei $9.3\% \pm 5.3\%$ der Fläche der Querschnitte innerhalb und außerhalb der idealen Form liegen. Abbildung 5.26 zeigt die Ergebnisse für die 24 Querschnitte durch den Kanal.

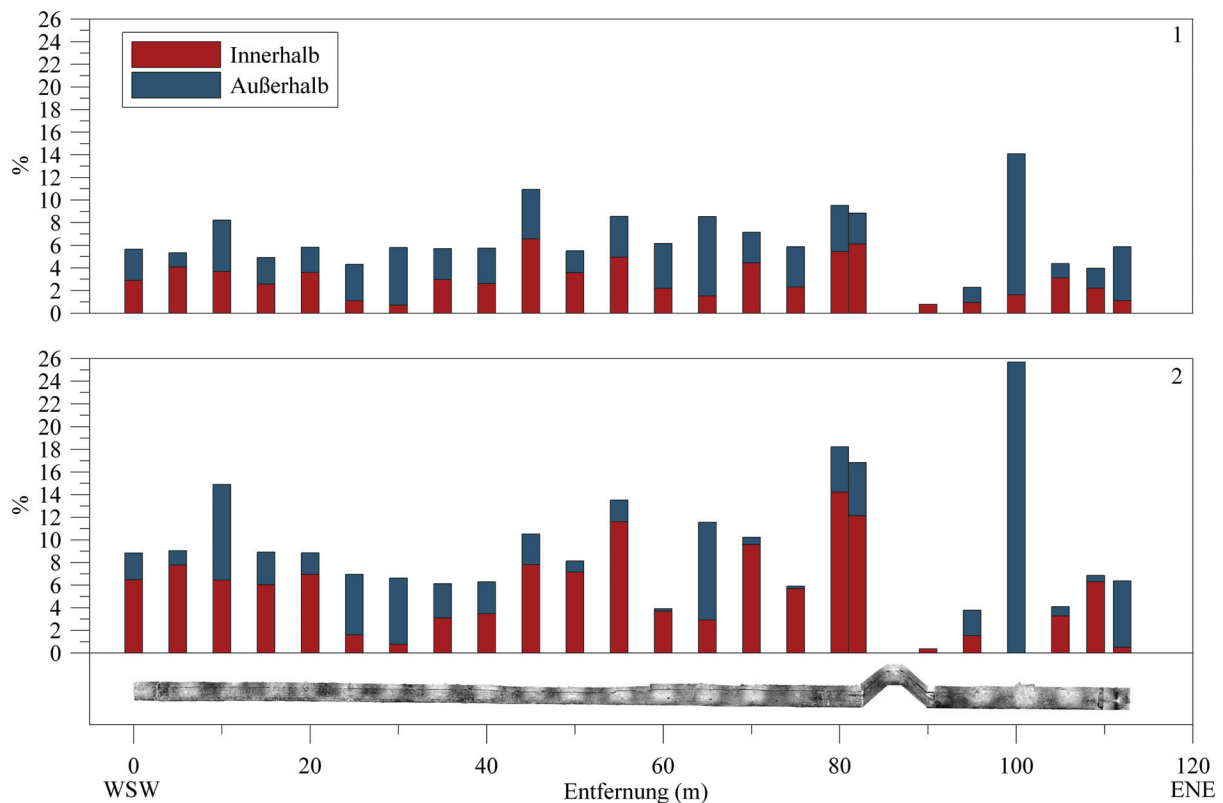


Abbildung 5.26: Abweichungen der Flächen der Querschnitte von der idealen Form. (1) Ergebnisse für die Gesamtquerschnitte, (2) Ergebnisse für den obersten Meter des Kanals.

Die Querschnitte bei 90 m und 100 m zeigen die größten Abweichungen vom Mittel (Abb. 5.26, 2). Zwischen 82.5 m und 90 m musste Ende der 1970er Jahre ein Teilstück des römischen Kanals entfernt werden, da ein moderner Abwasserkanal in diesem Bereich die Konstruktion quert. In diesem Bereich wurde, um den Zugang zum hinteren Teil des römischen Kanals weiterhin zu ermöglichen, ein Treppenübergang über den modernen Kanal eingebaut. Diese Betonkonstruktion geht im Bereich von 90 m in den römischen Kanal über. Der Querschnitt bei 90 m hat somit die moderne Konstruktion erfasst und zeigt daher nur sehr geringe Abweichungen von der idealen Form. Bei 100 m ist ein post-römischer Zugang im Deckenbereich eingebaut worden. Dieser Schacht wurde vom Querschnitt bei 100 m erfasst und führt zu hohen Abweichungen, die außerhalb der idealen Form liegen.

Im östlichen Abschnitt des Kanals wurde die Gewölbedecke aus opus caementicium gegossen, so dass keine Deformationen zwischen einzelnen Bauteilen bestimmt werden können. Über die 3D Daten wurde der Riss im Deckenbereich vermessen. Die Länge des Risses wurde direkt aus der Punktwolke ermittelt, die Öffnungsweiten und die Versatzbeträge aus 26 Querschnitten, die durch die Punktwolke senkrecht zur Längserstreckung des Kanals gelegt wurden. Im östlichen Bereich beginnt der Riss ohne vertikalen Versatz mit einer Öffnungsweite von bis zu 0.02 m. Der Riss setzt sich über knapp 7 m nach Westen fort. In diesem Bereich folgt eine Baufuge im Kanal. Hinter der Fuge setzt sich der Riss mit zunehmender Rissweite und vertikalem Versatz noch mindestens weitere 7 m fort. Insgesamt kann anhand der 3D-Daten eine minimale Risslänge von 14 m nachgewiesen werden. Zukünftige Untersuchungen nach der Ergrabung der Füllung werden zeigen ob sich der Riss noch weiter verfolgen lässt. Die Öffnungsweite erreicht im westlichen Bereich Beträge bis zu 0.06 m. Dazu kommt ein vertikaler Versatz von bis zu 0.15 m. Im Querschnitt zeigt sich, dass

die nördliche Hälfte der Decke im westlichen Bereich im Uhrzeigersinn (bei Blick nach Westen) rotiert ist (Abb. 5.27).

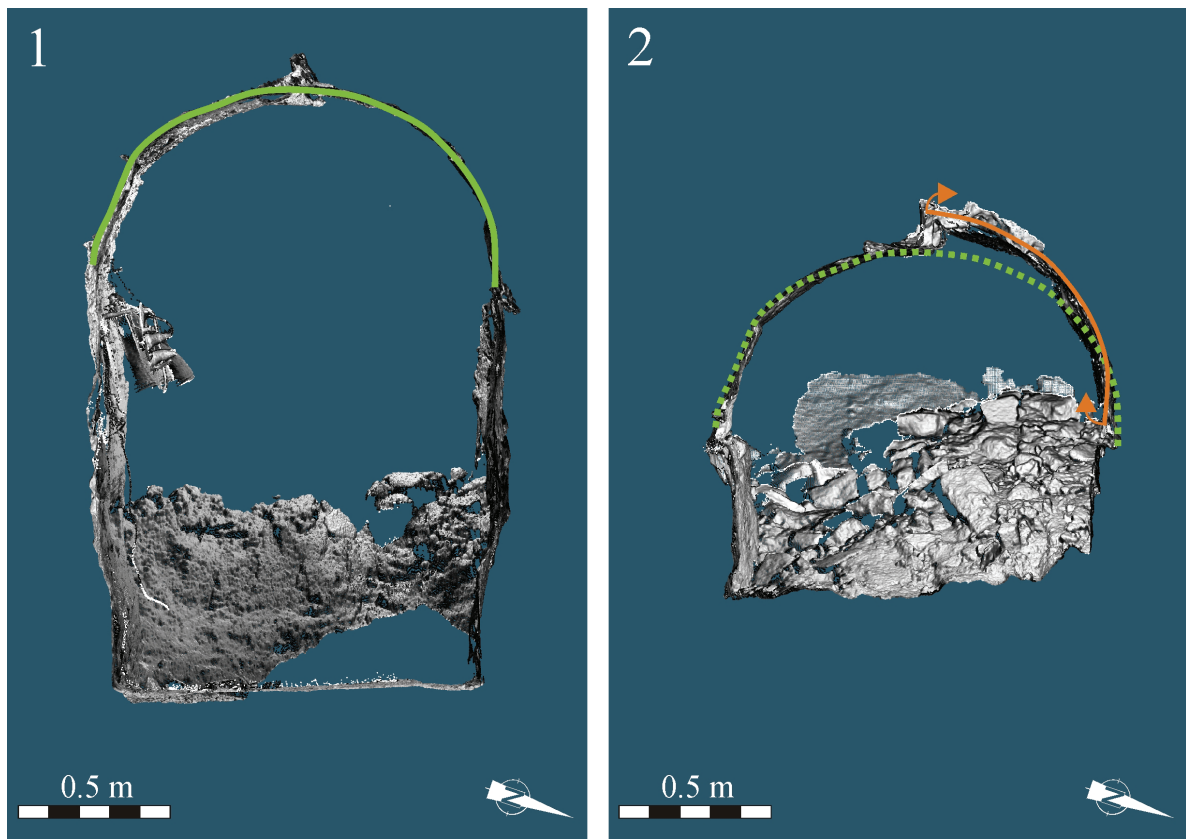


Abbildung 5.27: Schäden im Deckenbereich des östlichen Kanalabschnittes. (1) zeigt ein aus den 3D-Daten extrahiertes Orthophoto aus dem ungestörten, östlichen Bereich (Osten). (2) zeigt ein Orthophoto aus dem westlichen Bereich des östlichen Abschnittes. In (2) ist der Deckenverlauf aus dem ungestörten Bereich in (1) als gestrichelte grüne Linie eingezeichnet. Die orange Linie zeichnet den Deckenverlauf im rotierten Bereich nach.

Ein weiterer Befund im östlichen Teil des Abwasserkanals ist eine gestörte Sedimentabfolge, die im Zuge der archäologischen Ergrabung der Sedimentfüllung des Kanals gefunden wurde (Abb. 5.28). Hier zeigen die Schichten der Sedimentfüllung aus römischer Zeit Aufwölbungen und Verzahnungen die auf eine postsedimentäre Mobilisierung des Materials hindeuten (Abb. 5.28). Diese Strukturen können durch Bodenverflüssigung während einer dynamischen Belastung entstanden sein (pers. Kommunikation K. Vanneste, 2011), jedoch ist auch eine Mobilisierung des Materials bei wiederholtem Eindringen von Wasser durch die Kanalöffnung bei höheren Rheinwasserständen denkbar (pers. Kommunikation T. Niemi, 2011). Die Sohle des Kanals in diesem Bereich liegt bei ca. 42.3 m. Allein seit 1993 kam es in Köln fünfmal zu Hochwasserständen über 42.93 m.ü.N.N. die zu römischen Zeiten den Kanal über den Zulauf geflutet hätten. Die Schäden im Deckenbereich des Kanals können nur durch Vertikalbewegungen der Konstruktion erzeugt werden. Diese kann durch die Bodenbewegung eines Erdbebens erzeugt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass es sich beim Abwasserkanal um eine weitgehend abgedichtete Konstruktion mit einer relativ geringen Überdeckung aus Auffüllungen handelt. Derartige Konstruktionen können bei hohen Grundwasserständen Auftrieb bekommen, wodurch vertikale Bewegungen erzeugt werden (Prinz und Strauß, 2006).

Für die beschriebenen Abplatzungen können ebenfalls unterschiedliche Entstehungsursachen vermutet werden. Eine Erklärung kann gewöhnliche Verwitterung der Tuffblöcke sein. Gerade im Kontaktbereich mit der feuchten Sedimentfüllung kann Tuff derartige Verwitterungsformen zeigen (Stück et al., 2008). Eine weitere Möglichkeit ist die Wechselwirkung benachbarter Blöcke unter dynamischer Belastung. Derartige Abplatzungen sind jedoch bei härteren Baumaterialien zu erwarten und konzentrieren sich auf die Ecken einzelner Blöcke (Marco, 2008; Caputo et al., 2010). Die Befunde im Abwasserkanal betreffen meist komplette Blöcke und sind daher vermutlich durch Verwitterung des Materials entstanden.

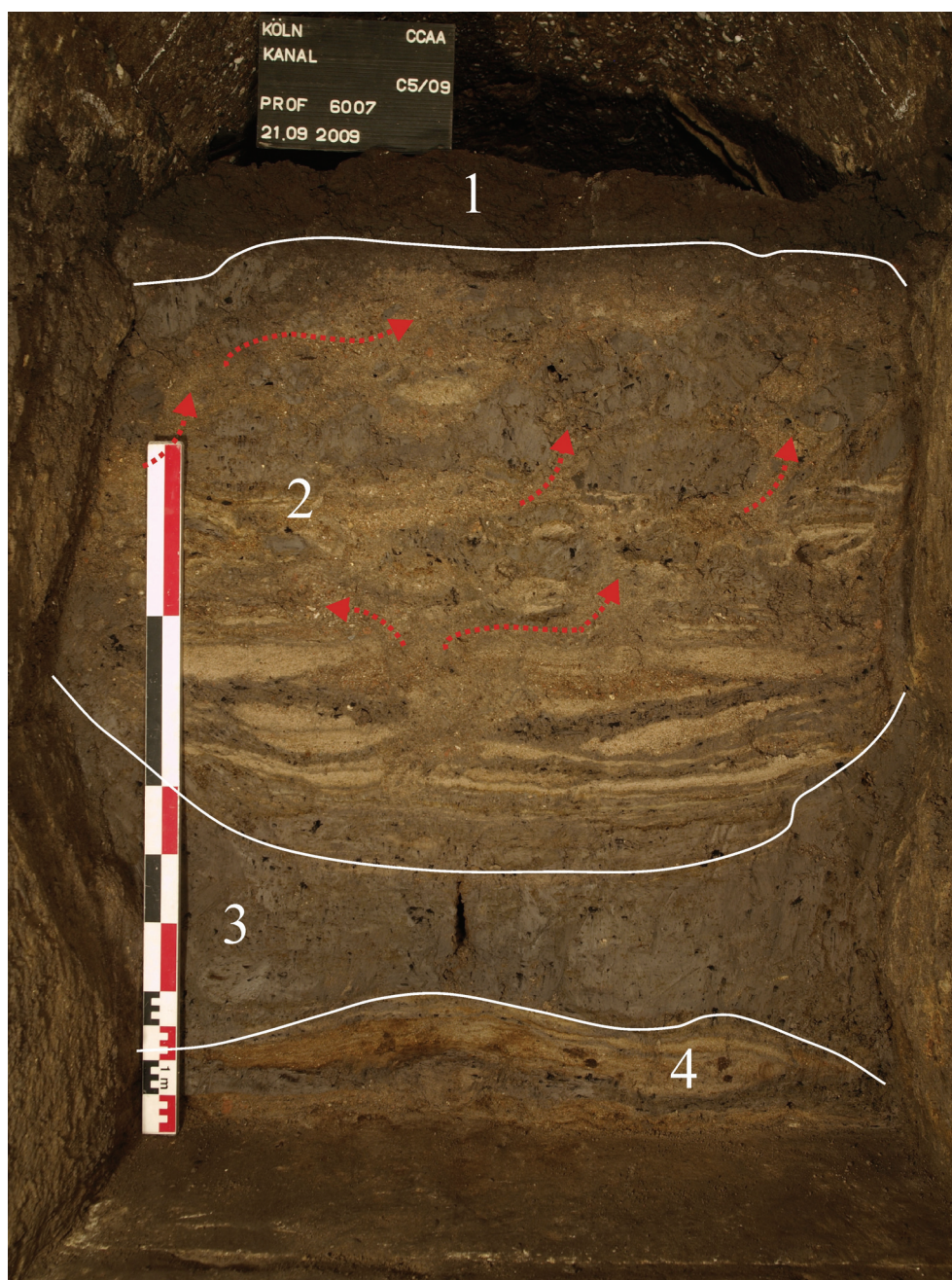


Abbildung 5.28: Sedimentprofil im östlichen Bereich des Abwasserkanals. Die Pfeile deuten mögliche Mobilisierungsrichtungen an (nach K. Vanneste, pers. Komm., 2011). (1) moderne Ablagerungen, (2)-(4) archäologisch unterschiedliche Ablagerungen, die jedoch alle ausschließlich römische Keramik enthalten (Photo: Archäologische Zone Köln, 2009).

5.3 Der Rathausplatz

Der heutige Rathausplatz bildet den südlichen Teil des in Kapitel 5.1 beschriebenen administrativen Bezirkes. Schon zu römischen Zeiten erstreckten sich die Ausläufer des Statthalterpalastes von Norden auf den heutigen Rathausplatz (Abb. 5.29).



Abbildung 5.29: Übersicht der archäologischen Befunde auf dem Rathausplatz. Im Hintergrund liegt ein Plan der archäologischen Befunde, kombiniert mit Orthophotos der 3D Modelle im nördlichen Bereich des Rathausplatzes (Plan: Schütte und Gechter, 2011).

Nach der Merowingerzeit verlagerte sich das Zentrum der Administrative in Richtung seiner heutigen Lage. Im nördlichen Abschnitt findet man mit dem Praetorium und seiner Peripherie fast ausschließlich Befunde aus römischer Zeit, auch wenn diese zum Teil in späteren Epochen überprägt wurden. Im Bereich des Rathausplatzes tritt die Befunddichte aus imperialer Zeit zugunsten der Befunde des mittelalterlichen, jüdischen Viertels zurück.

Sicher datierte römische Befunde finden sich nur im Bereich der Apsis, dem Porticus-Bereich und nördlich der Synagoge. Für Befunde unter der Frauensynagoge und auf dem Grabungsfeld Süd sind die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen und es liegen noch keine abschließenden Datierungen vor.

Neben den zeitlichen Unterschieden der Gebäude unterscheiden sich die beiden Areale auch in der Art der Bebauung. Während im nördlichen Bereich mit dem Praetorium (Kapitel 5.2) und seiner Peripheriegebäude ein geschlossener Gebäudekomplex liegt, dominieren auf dem Rathausplatz wesentlich kleinere Einzelkonstruktionen. Das Spektrum der Datierungen dieser Befunde deckt nahezu das komplette Mittelalter ab. In den folgenden Abschnitten werden diese Einzelbefunde vorgestellt die teilweise einen langen Nutzungszeitraum nachweisen können. Im Folgenden wird der Rathausplatz und damit der Grabungsbereich der Archäologischen Zone als südlicher Bereich des administrativen Bezirkes bezeichnet, auch wenn dieser sich zeitweise über die Grenzen des heutigen Rathausplatzes ausgedehnt hat.

Der Rathausplatz wird heute nach Westen von der Strasse „Unter Goldschmied“, nach Norden von der „Portalsgasse“, im Westen vom Rathaus sowie im Süden von der Strasse „Obenmarspforten“ und dem angrenzenden Wallraf-Richartz-Museum begrenzt (Kapitel 3, Abb. 3.3). Vor Beginn der Ausgrabungen wurde der Rathausplatz von der römischen Apsis vor dem Rathaus und von der modernen Glaspypamide, die die mittelalterliche Mikwe überspannt geprägt. Nach Abschluss der Grabungsarbeiten entsteht auf dem Rathausplatz mit dem Museumsbau das Zentrum der neuen Archäologischen Zone.

5.3.1 Porticus

EINLEITUNG

Bei dem als „Porticus“ bezeichneten Bereich handelt es sich um ein in den 1960er Jahren ergrabenes Areal (Precht, 2008) mit Befunden aus römischer und mittelalterlicher Zeit.

Die Porticus befindet sich im Untergrund des Rathausplatzes unmittelbar zwischen der mittelalterlichen Laube des Rathauses und der Apsis römischen Ursprungs. Namensgebend für den Bereich ist eine gut erhaltene Bogenstellung die zum Praetorium der dritten Bauperiode gehört. Neben diesen Befunden aus dem zweiten Jahrhundert n. Chr. finden sich präkoloniale (<50 n. Chr.), weitere römische Befunde (1. Jahrh. n. Chr., 2.-3. Jahrh. n. Chr.) sowie Befunde aus dem Mittelalter (~11. Jahrh., 13. Jahrh.). Die Gebäudereste sind unmittelbar ineinander verzahnt. Es finden sich in diesem Abschnitt archäologische Befunde aus einem Zeitraum von ca. 1200 Jahren (Abb. 5.30). Der Bereich wurde schon 1969 ergraben, ist jedoch erst seit 2007 durch den Keller des Rathauses begehbar (Schütte und Gechter, 2011).

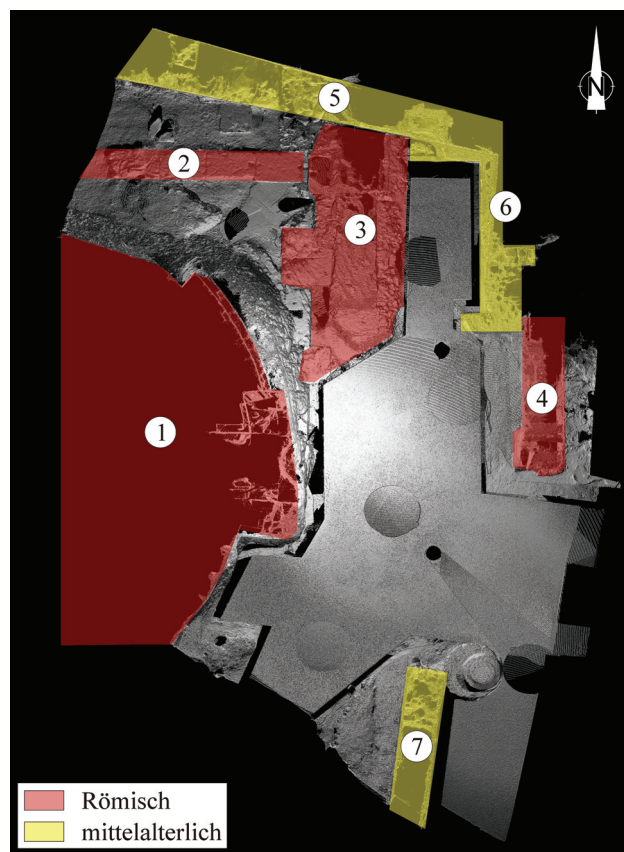


Abbildung 5.30: Übersicht über die zeitliche Einordnung der Befunde im Porticus-Bereich. (1) Römische Apsis, (2) Fundamentreste eines römischen Kultbaus, (3) Südliche Ausläufer der Praetoriums (Periode III), (4) Bogenstellung der Rheinfassade des Praetoriums (Periode III), (5) Nordwand des mittelalterlichen Hospitals, (6) Ostwand des mittelalterlichen Hospitals, (7) Reste des Haus Lyvermann (Mittelalter).

BAUGESCHICHTE

Die römischen Befunde in der Porticus lassen sich in den Bereich der Apsis und den Bereich des Praetoriums unterteilen. Die Apsis umfasst Befunde vom 1. bis zum Ende des 3.

Jahrhunderts n. Chr., die einem öffentlichen Gebäudekomplex zugerechnet werden, der im Verlauf verschiedener Bauphasen schließlich mit dem Praetorium der dritten Bauphase (siehe Kap. 5.2.1) verbunden wurde. Neben der Apsis selbst, deren interner Aufbau in Kapitel 5.3.2 beschrieben wird, findet sich eine West-Ost verlaufende, massive Fundamentmauer (Abb. 5.30, 2), welche von Schütte und Gechter (2011) als Reste eines Kultbaus aus der Mitte des ersten Jahrhunderts n. Chr. interpretiert werden. Im östlichen Teil der Porticus dominieren die Reste des Praetoriums der dritten Bauphase. Neben Resten der Nord-Süd verlaufenden Mauer 158b, welche die Rückwand der südlichen Porticusstellung bildete sind Reste ehemaligen Fassade erhalten. Diese südlichen Verlängerung der Mauer 105b beinhaltet eine massive, in einer späteren Bauphase verschlossene, Bogenstellung (605, 306, 307) (Abb. 5.31).

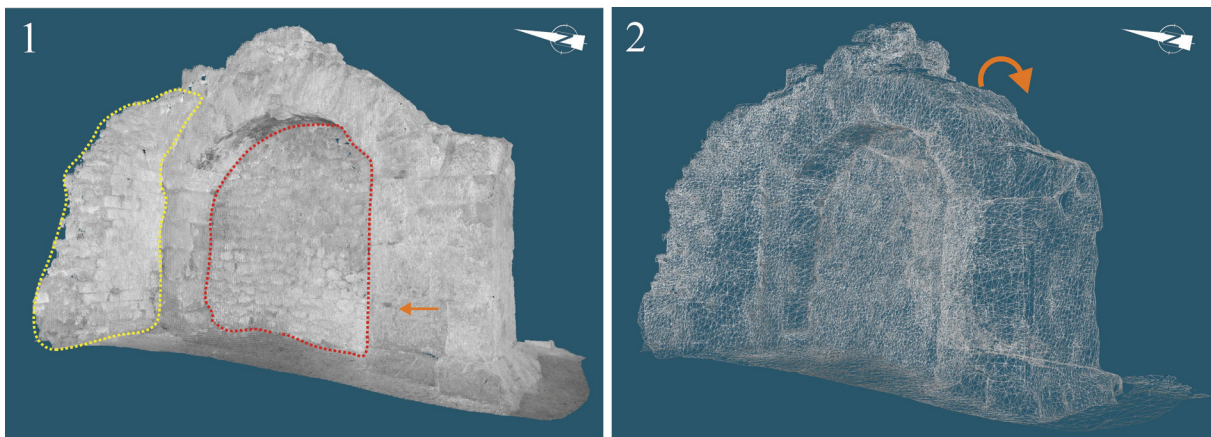


Abbildung 5.31: Bogenstellung im Porticus-Bereich. (1) Zeigt das 3D-Modell der Punktwolke, (2) ein daraus berechnetes Gitternetz. Die rote Linie markiert die in einer späteren Bauphase hinzugefügte Vermauerung, die gelbe Linie die anschließende mittelalterliche Bebauung. Der Pfeil markiert die Spuren der Befestigung einer Vergitterung.

Der größte Teil der Porticus wird von den Resten des mittelalterlichen jüdischen Hospitals eingenommen. Nach Schütte und Gechter (2011) wird das Hospital schon Ende des 11. Jahrhunderts schriftlich erwähnt. Erhalten sind im Bereich der Porticus zum einen die Nordwand des Hospitals, die auch den Nordabschuss des ergrabenen Bereiches bildet sowie die Ostwand, die sich nördlich an die erhaltene römische Bogenstellung anschließt. Bei der solitär stehenden Mauer im Süden der Porticus handelt es sich um Reste der Ostwand des mittelalterlichen Hauses Lyvermann, welches gegen Ende des 13. Jahrhunderts errichtet wurde.

BAUBESCHREIBUNG

Die West-Ost verlaufende Fundamentmauer im nordwestlichen Bereich besteht aus massiven Tuffblöcken, die mit dem Schwalbenschwanzverfahren (Abb. 5.30, 2) verbunden waren (Schütte und Gechter, 2011). Die Reste der ehemaligen Rückwand der Porticusstellung (158b) zeigen einen mehrschaligen Aufbau. Über einem Fundament aus massiven Tuffblöcken ist zwischen einer beidseitigen Verkleidung aus bearbeiteten Tuffblöcken mittlerer Größe eine Füllung aus Bruchsteinen und opus caementicium zu finden (Abb. 5.30, 3). Die Bogenstellung (Abb. 5.30, 4) ist aus größeren Tuffblöcken aufgebaut, die mörtellos aufeinander gesetzt wurden. Bei der Vermauerung in einer späteren Bauphase wurden kleinere, vermörtelte Tuffhandquader verwendet. An der Westseite der Bogenstellung sind Spuren von Befestigungsankern für eine Vergitterung zu finden (Precht, 2008) (Abb. 5.31).

Die erhaltenen Wände des mittelalterlichen Hospitals werden aus wieder verwendeten Tuffquadern mittlere Größe aufgebaut, die in regelmäßigen Abständen von Lagen aus Basaltsäulen unterbrochen werden (Abb. 5.32). Neben dem ungewöhnlichen Wandaufbau finden sich in den Wänden des Hospitals weitere Anomalien. In der Nordwand ist in einer Höhe von 46.0 m ü.NN eine Nische eingelassen, deren Zweck bislang noch nicht bekannt ist. In der Ostwand ist in einer Höhe von 47.88 m ü.NN ein Wandschrank in die Mauer integriert. Dieser ist mit großen Schieferplatten ausgelegt. Die Laibung des Schrankes besteht aus Trachyt (Schütte und Gechter, 2011). Im Süden der Porticus stehen Reste des mittelalterlichen Haus Lyvermann. Hier wurden vor allem unregelmäßige Tuffblöcke und vereinzelt Basaltsäulen wieder verwendet.

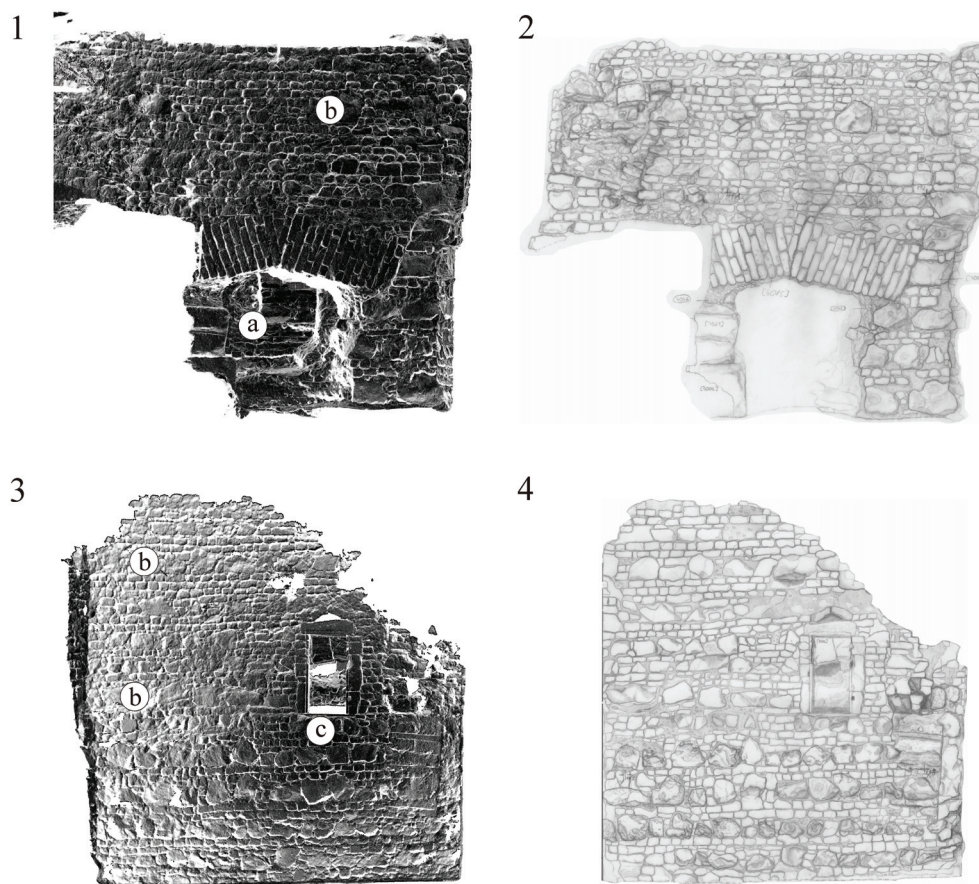


Abbildung 5.32: Nord- (1+2) und Ostwand (3+4) des mittelalterlichen Hospitals. (1+3) Orthophotos die aus der 3D Punktwolke extrahiert wurde. (a) markiert eine Nische in der Nordwand, deren Nutzung bislang nicht geklärt ist (b) markiert die Basaltzwischenlagen, (c) einen in die Ost-Wand eingearbeiteten Schrank. (2+4) Archäologische Zeichnungen auf Grundlage der Laserscandaten (nach Hinzen et al., 2011).

KARTIERUNG

Der Bereich der Porticus wurde mit insgesamt zehn Scans kartiert. Die Einzelscans konnten mit einem mittleren Registrierungsfehler von 0.00158 m verknüpft werden. Der mittlere Fehler der Georeferenzierung lag im Bereich der Porticus bei 0.0048 m. Die größte Herausforderung bei der Kartierung des Areals waren die vielen Stufen, Nischen und modernen Stützpfeiler die sehr viele Abschattungen in den Daten erzeugt haben. Abbildung 5.33 zeigt eine Übersicht über die Scannerstandorte.

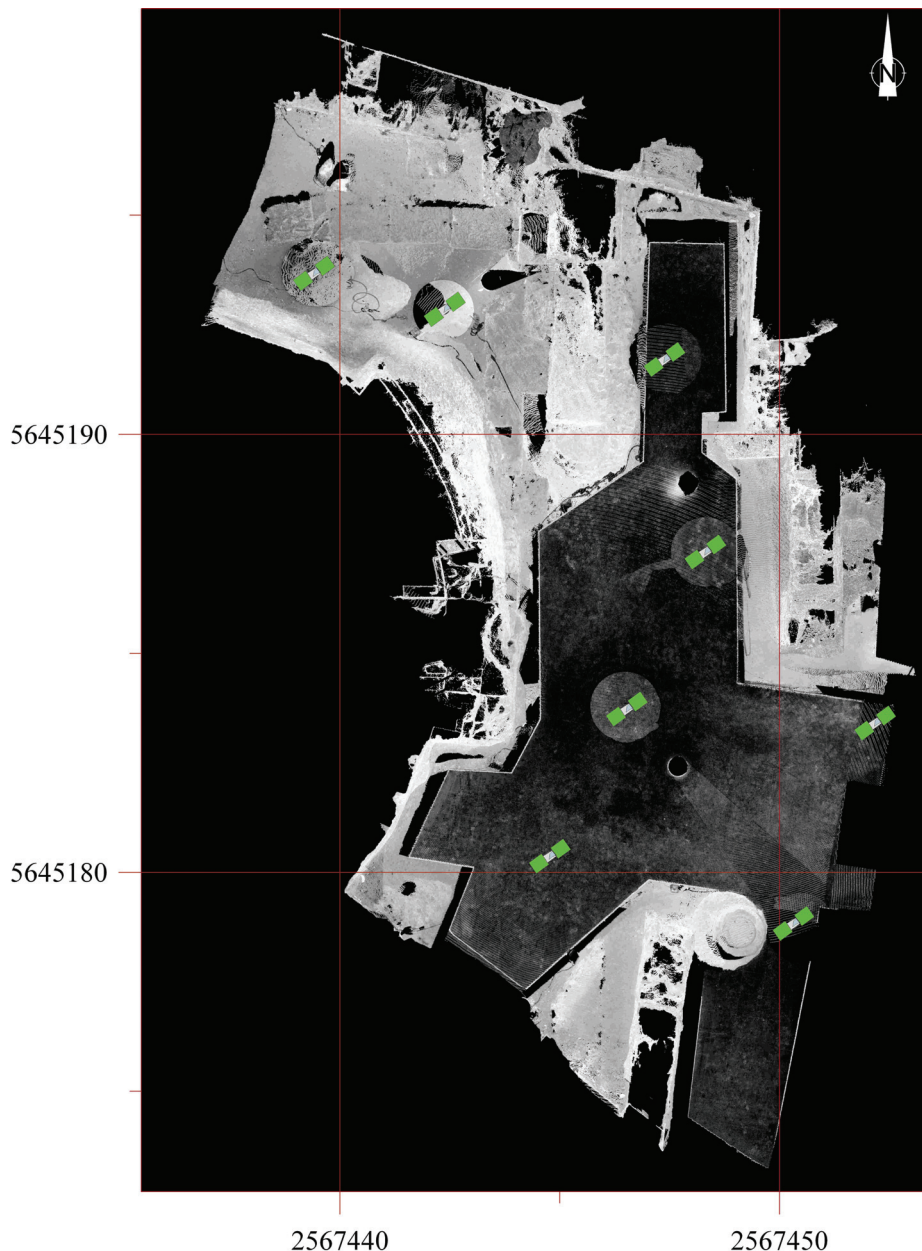


Abbildung 5.33: Scannerstandorte bei der Kartierung des Porticus Bereichs.

Im Bereich der Porticus konnten die aufgenommenen 3D-Daten genutzt werden um die archäologischen Arbeiten zu unterstützen. Die relativ großen Wände des Hospitals wurden als Orthophotos aus der Punktwolke extrahiert. Anhand der flächentreuen Bilder wurden die Geometrie und die Maße der Wände bzw. der einzelnen Blöcke erfasst. Dieses Grundgerüst wurde durch die archäologische Interpretation ergänzt (Abb. 5.32).

SCHÄDEN

Im Bereich der Porticusstellung konnten Neigungsschäden, Risschäden sowie anthropogen verursachte Schäden nachgewiesen werden (Abb. 5.34).

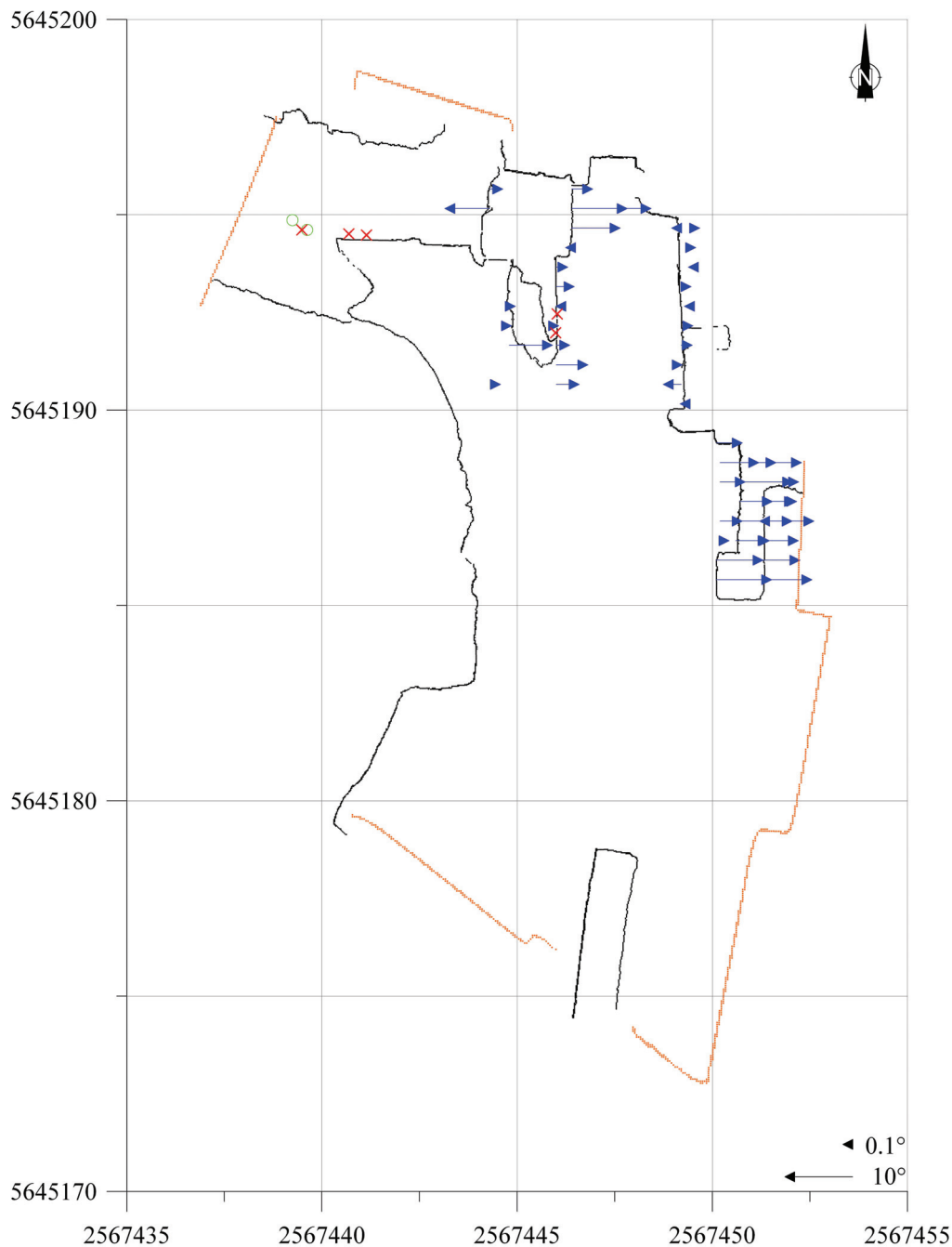


Abbildung 5.34: Verteilung der Schäden im Bereich der Porticus. Die blauen Vektoren geben die Richtung der Neigungsschäden an. Die Länge der Vektoren zeigt den Betrag der Neigungen. Rote Kreuze zeigen die Lage von Rissen, grüne Kreise anthropogen verursachten Schäden. Der schwarze Umriss zeigt archäologische Befunde, der orange moderne Strukturen.

Die Neigungsschäden folgen in diesem Bereich mit einer Hauptneigungsrichtung nach Osten den Befunden im nördlich gelegenen Praetorium. Die mittelalterlichen Gebäudereste in diesem Bereich zeigen keine signifikanten Neigungen (Abb. 5.34). Die Neigungen wurden mit insgesamt 31 Schnitten in West-Ost-Richtung durch die 3D-Punktwolke quantifiziert. Zehn Schnitte lagen hierbei im Bereich der Mauer des Hauses Lyvermann, an der keine Neigung nachgewiesen werden konnte. Die maximale Neigung Richtung Osten beträgt 10.2° , Richtung Westen 5.8° . Die Neigungsmessungen mit den höchsten Beträgen in beide Richtungen liegen an den römischen Befunden im zentralen nördlichen Teil des Areals. Es handelt sich hierbei um die Reste der Nord-Süd verlaufenden Mauer 158b, die aus

mehrschaligem Mauerwerk aufgebaut ist. Die Neigungswerte zeigen, dass sich der westliche Teil der Mauer nach Westen neigt, während der östliche Teil nach Osten geneigt ist. Hierfür liegt der Grund vermutlich in einem „Aufliedern“ der Mauerwerksschalen, dass durch die Beschädigung der Gesamtstruktur der Mauer ermöglicht wird. Der maximale Wert in östlicher Richtung im Bereich der Bogenstellung liegt bei 7.9° . Im Mittel ist die Bogenstellung um $3.9^\circ \pm 2.5^\circ$ in Richtung Osten geneigt. Risssschäden wurden in den Fundamenten der Mauer 158b sowie in einzelnen Blöcken der Bogenstellung nachgewiesen. Insgesamt finden sich jedoch sehr wenig Risse und Brüche, so dass hierüber keine Erkenntnisse über den schadensverursachenden Mechanismus getroffen werden können. Im Bereich der Fundamente des römischen Kultbaus im Nordwesten des Areals wurde ein Bruchschaden in Kombination mit einer Rotation gegen den Uhrzeigersinn dokumentiert (Abb. 5.35, 1).

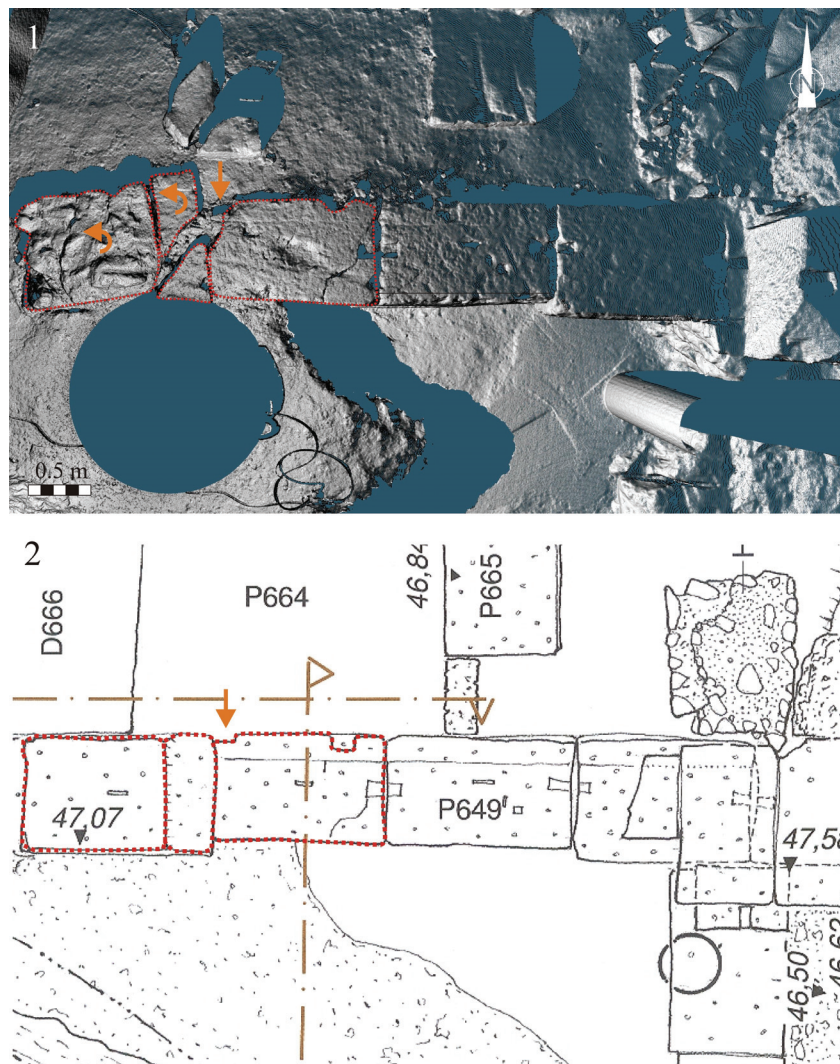


Abbildung 5.35: Anthropogen verursachter Schaden im Bereich der Fundamente des römischen Kultbaus (1). (2) zeigt einen Plan der Grabungen von 1968 (aus Precht, 2008), bei dem keine Rotation an dieser Stelle zu sehen ist. Die orangenen Pfeile markieren einen Bruchschaden am benachbarten Block, der ebenfalls im Plan nicht zu sehen ist.

Aufgrund der Sichtung von Plänen der Grabungen aus den 1950er und 1960er Jahren konnte nachgewiesen werden, dass zu dieser Zeit zumindest die Rotation an dieser Stelle noch nicht vorgelegen hat (Abb. 5.35, 2) und nachträglich entstanden sein muss.

Die Neigungen der römischen Befunde deuten wie schon im Praetorium auf eine Bewegung im Untergrund der Konstruktionen. Betrachtet man die Befunde aus dem Praetorium der vierten Bauphase gemeinsam mit den römischen Befunden aus dem Porticus Bereich, zeigt sich, dass Gebäudeteile auf einem knapp 100 m langen Abschnitt in der Tendenz nach Osten, zum Rhein hin, geneigt sind.

5.3.2 Römischer Brunnen und Apsis

EINLEITUNG

Seit ihrer erneuten Ausgrabung im Jahr 1968, im Zuge von Bauarbeiten auf dem Rathausplatz, prägt die römische Apsis mit dem zentral liegenden Brunnen den Rathausplatz. Die Interpretation dieses Teil der römischen Bebauung ist aus archäologischer Sicht umstritten. Precht (2008) sieht in der Apsis einen Teil des Praetoriums der dritten Bauperiode der im Zuge der Bauarbeiten an diesem Gebäude entstanden ist. Neuste Untersuchungen im Rahmen der Einrichtung der Archäologischen Zone zeigen jedoch, dass die Baugeschichte der Apsis wesentlich länger zurückreicht und der interne Aufbau durch mehrere Bau- und Umbauphasen geprägt ist (Schütte und Gechter, 2011).

BAUGESCHICHTE

Die Baugeschichte der Apsis reicht bis in die erste Hälfte des ersten Jahrhunderts zurück. In diese Zeit lässt sich die erste nachgewiesene Bauphase im westlichen Bereich der Apsis einordnen. Insgesamt gehen Schütte und Gechter von mindestens sieben Bauphasen aus (Abb. 5.36).

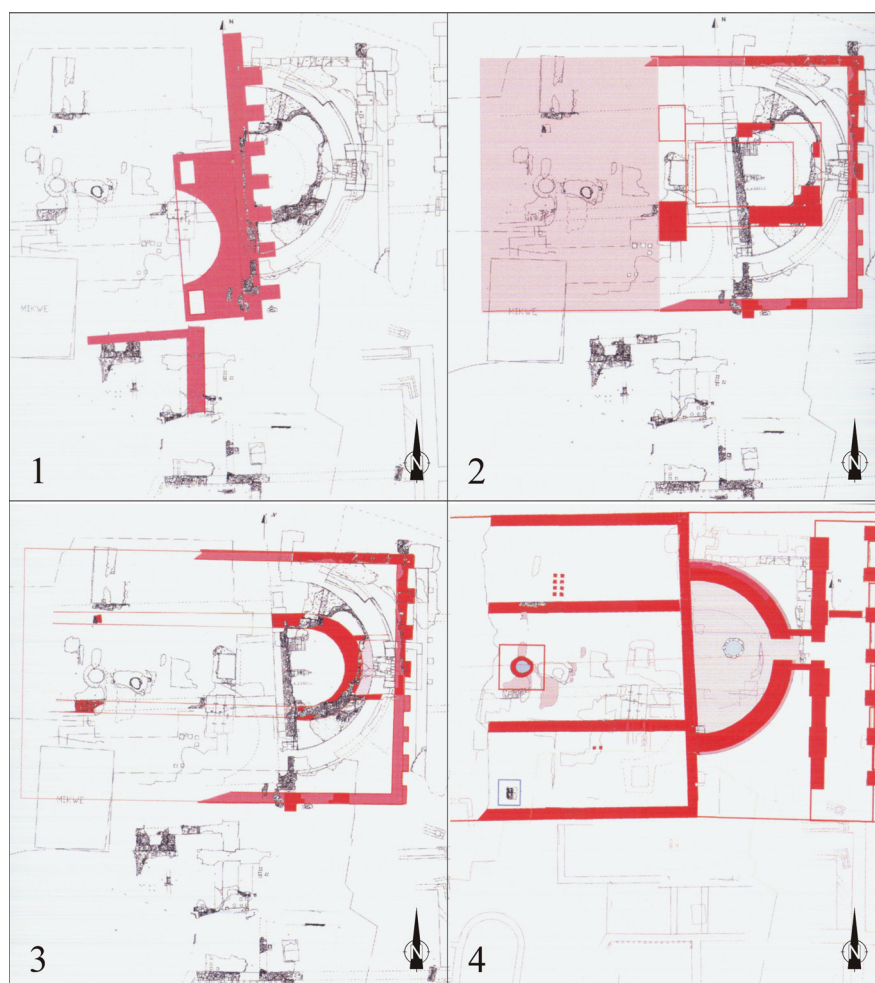


Abbildung 5.36: Bauphasen im Bereich der Apsis auf dem Rathausplatz. (1) Phase I, (2) Phase II, (3) Phase III, (4) Phase VI/VII (aus Schütte und Gechter, 2011).

Bei den Grabungen im Innerraum der Apsis wurde eine massive Nord-Süd verlaufende Hangstützmauer gefunden, die nach Osten von massiven, trigonalen, Ost-West verlaufenden Tuffmauern zusätzlich verstärkt wird (Schütte und Gechter, 2011). Zwischen diesen Stützwänden liegt eine Grauwacke-Gussmauer, die erst nach der Errichtung der Stützmauern eingefügt wurde. Westlich der Apsis vermuten Schütte und Gechter (2011) einen Kultbau, der um die Zeit der Koloniegründung um- oder neugebaut wurde.

Im Bereich der damals noch nicht existierenden halbrunden Apsis wurde ein massives Bauwerk auf einem Fundament aus Tuffquadern errichtet. Im Osten der heutigen Apsis wurde das Fundament durch eine Nord-Süd verlaufende Mauer gestützt. Nach Schütte und Gechter (2011) handelte es sich bei dem Gebäude um einen tempelähnlichen Kultbau oder den Teil eines Kultbaus, dessen Fortsetzung im Westen bislang weder belegt, noch ausgeschlossen werden kann.

In einer dritten Phase wurde der bestehende Umriss der zweiten Bauphase, mit den massiven Tuffmauern im Norden, Westen und Süden sowie der Stützmauer im Osten weiterverwendet. Innerhalb des bestehenden Umrisses wurde, eine halbrunde Apsis errichtet, die sich im Westen im rechteckigen Grundriss eines anschließenden Gebäudes fortsetzte (Schütte und Gechter, 2011). Die Funktion oder Nutzung des Gebäudes ist bislang ungeklärt.

In der vierten Bauphase wurde die Grundanlage der bis heute sichtbaren Apsis errichtet. Die Überreste der Vorgängerbauten wurden teilweise abgerissen und teilweise in das Fundament der neu entstehenden Apsis integriert. Die Apsis dieser Phase war vermutlich ein eigenständiger Bau. Eine Verbindung zu Gebäuden im Westen auf dem Rathausplatz kann aufgrund der unterschiedlichen Laufniveaus ausgeschlossen werden. Im Osten der Apsis wurde zu dieser Zeit der Porticusbau des Praetoriums der dritten Bauperiode errichtet.

In der fünften Bauphase kommt es zu einem internen Umbau der Apsis. In der Nordwest- und der Südwest-Ecke der Apsis werden kleinere Praefurniae (Heizstellen), im östlichen Scheitelpunkt der Apsis ein großes Praefurnium errichtet. Der Boden der Apsis wird hypocaustiert und ist damit beheizbar (Schütte und Gechter, 2011). Die Heizstellen im westlichen Bereich zeigen keinerlei Spuren von Hitzeeinwirkung und wurden daher wahrscheinlich nie genutzt. Das große Praefurnium im Osten zeigt deutliche Nutzungsspuren. Gegen Ende der fünften Bauphase wird die Hypocaustanlage abgebrochen und die Apsis bis über das Niveau der westlichen Praefurniae verfüllt. Eine Verbindung zu einem Gebäude im Westen der Apsis ist für diese Phase unwahrscheinlich.

In der sechsten Bauphase wurde ein Gussfundament in die Apsis eingebracht, das tief in die schon bestehende Bausubstanz eingreift. Die massive Bauweise deutet darauf hin, dass größere Lasten aufgenommen werden sollten. Spätestens in dieser Bauphase bestand ein Zugang zum Gebäude im Osten der Apsis.

In der siebten Bauphase wird der Zugang zum östlichen Gebäude verbreitert. Im Westen wird über eine Stylobatenmauer ein Zugang zu einem westlich angrenzenden Gebäude geschaffen. Vermutlich wurde in dieser Phase der zentrale Brunnen angelegt. Zeitlich lassen sich die sechste und siebte Bauphase in die Spätantike einordnen (Schütte und Gechter, 2011).

BAUBESCHREIBUNG

Die frühen Bauphasen der Apsis sind nur durch Einzelbefunde nachzuweisen, daher ist eine detaillierte Baubeschreibung nicht möglich. Einzig die massive Tuffarchitektur kann als charakteristisch für die ersten drei Bauphasen angesehen werden.

Die Reste der späteren Bauphasen wurden der Folgezeit stark überprägt. Im Mittelalter wurde der interne Aufbau der Apsis mehrmals um- und überbaut. Precht (2008) berichtet zudem von einem Schaden durch eine Bombe aus dem 2. Weltkrieg im südöstlichen Bereich.

Das innere Rund der Apsis ist aus sehr genau gearbeiteten Tuffhandquadern gearbeitet, die in regelmäßigen Abständen von Ziegellagen unterbrochen werden. Den Übergang zum Gussfundament aus opus caementicium bildet ein zweilagiges Ziegelband (Precht, 2008).

Bei der Ausgrabung 1968 wurde eine in Teilen erhaltene, dünne Putzschicht auf der Innenwandung gefunden. Abbildung 5.37 zeigt einen Überblick über die Apsis vor Beginn der Ausgrabungen im inneren Bereich.

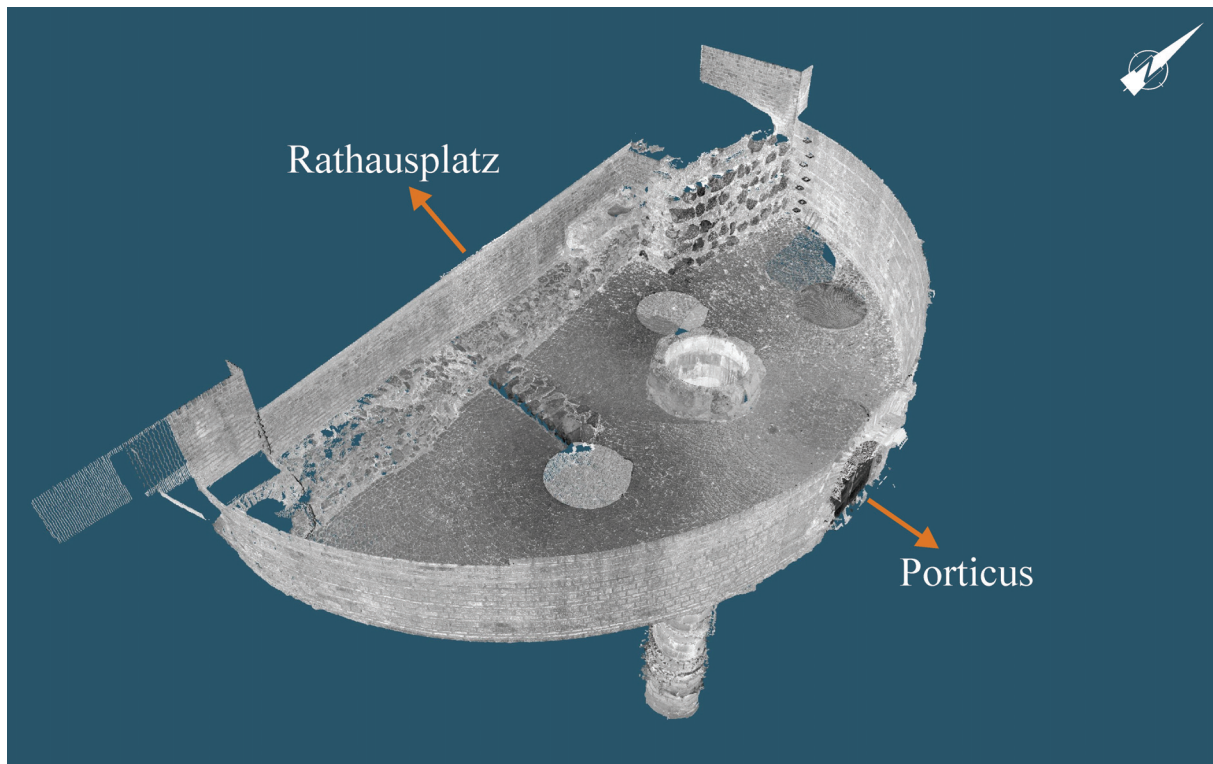


Abbildung 5.37: 3D-Punktwolke der Apsis mit zentral gelegenem Brunnen, vor Beginn der Ausschachtung des Innenraumes.

Die Außenseite des Apsisrundes war nach Precht (2008), der Architektur der Innenwandung folgend, aus einer Wechsellagerung von Tuffhandquadern und Ziegelbändern aufgebaut. Der römische Brunnen der zentral in der Apsis gelegen bis auf eine Höhe von mindestens 37.34 m ü.NN herabreicht ist aus 359 Trachytblöcken in mindestens 36 Lagen aufgebaut. Die Blöcke besitzen eine Höhe von 0.3 bis 0.4 m und eine Breite von 0.4 bis 0.7 m. Der vertikale Schacht hat an der Brüstung bei 49.85 m ü. N.N. einen Durchmesser von 1.55 m. Im tieferen Bereich ist der Brunnen stark deformiert und zeigt an der engsten Stelle nur noch eine Breite von 1.19 m. Im oberen Bereich sind die Fugen zwischen den Blocklagen mit Schieferstücken

gefüllt. In den tieferen Bereichen werden die Fugenräume immer größer. Hier sind die Fugen, vermutlich im Zuge von mittelalterlichen Reparaturarbeiten, mit ganzen Ziegeln gefüllt.

Der Brunnen kann in zwei Bereiche unterteilt werden. Der untere starke gestörte Bereich ab einer Tiefe von ca. 5.5 m liegt noch im Originalzustand vor. Die hier auftretenden Beschädigungen werden im Abschnitt „Schäden“ behandelt. Der obere Bereich wurde Anfang des 10. Jahrhunderts repariert. Hier müssen demnach so starke Schäden vorgelegen haben, dass die Benutzbarkeit des Brunnens eingeschränkt war. Eine Baugrube, die alle älteren Bauphasen durchdringt kann für diesen Bereich nachgewiesen werden (Schütte und Gechter, 2011). Neben der Baugrube wurden drei Pfostenlöcher gefunden, die als Befestigung für Stützen eines Dreibeins, welches als Kran gedient hat, gedeutet werden (Schütte und Gechter, 2011). Historische Quellen belegen eine Nutzung des Brunnens im Mittelalter als Waschbrunnen vor der Synagoge (Schütte und Gechter, 2011).

KARTIERUNG

Der Innenraum Apsis wurde vor Beginn der Ausgrabungen mit drei Scans aufgenommen. Nach Ende der Grabungsaktivität wurden sieben zusätzliche Scans in den unterschiedlichen Gruben im Inneren der Apsis durchgeführt, wobei auch ältere Bauphasen dokumentiert werden konnten (Abb. 5.38).

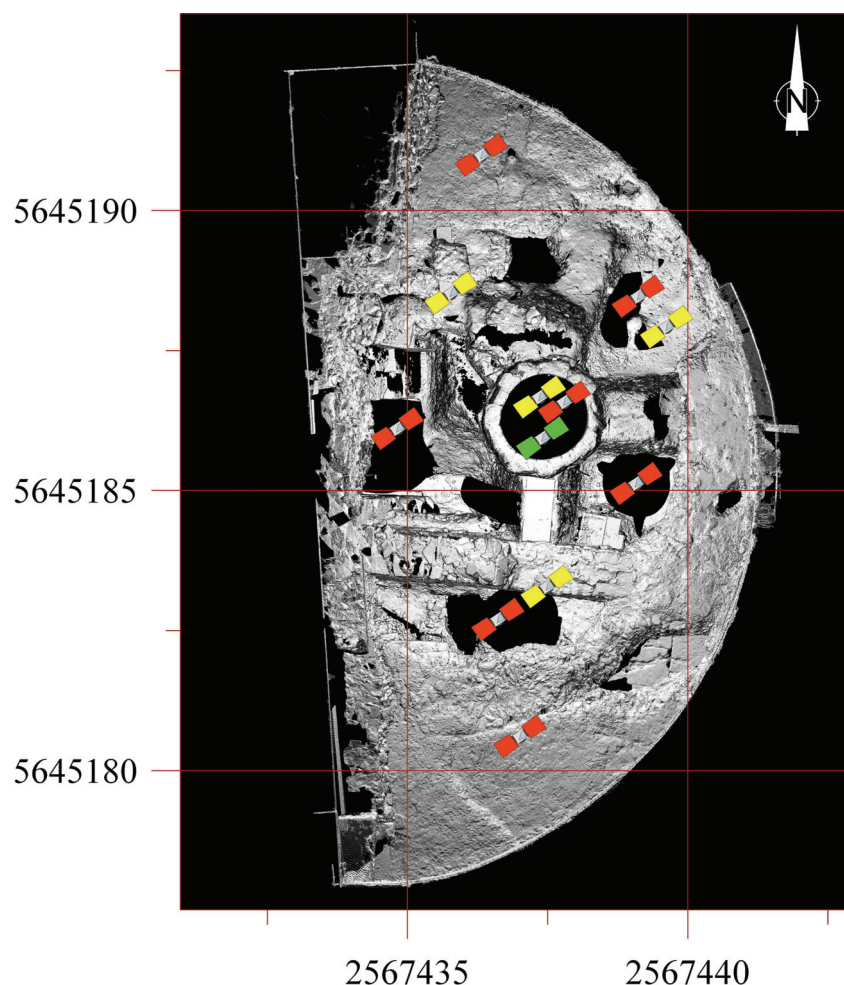


Abbildung 5.38: Scannerstandorte im Bereich der Apsis. Gelb: Scans vor der Ausgrabung des Innenraums, Grün: Zweite Scankampagne des Brunnens, Rot: Scans nach der Ausschachtung der Apsis.

Für den römischen Brunnen musste eine spezielle Technik entwickelt werden, um den vertikalen Schacht möglichst abschattungsfrei erfassen zu können. Wie in Fleischer et al. (2010) beschrieben wurde eine spezielle Haltevorrichtung für den Laserscanner konstruiert. Anforderungen an diese Haltevorrichtung waren:

- (1) Die Möglichkeit den Scanner kopfüber zu montieren, um den eigentlichen Brunnenbereich nicht abzuschatten,
- (2) Die Möglichkeit den Scanner ohne größere Umbauarbeiten in verschiedene Höhenlagen im Brunnenschacht zu bringen.
- (3) Die Möglichkeit der Fixierung des Gerätes während des Scanvorgangs.

Um diese Anforderungen zu erfüllen wurde eine Aluminiumplatte mit einem Durchmesser von 0.44 m mit drei pneumatischen Zylindern ausgestattet und an einer elektrischen Winde montiert (Abb. 5.39).

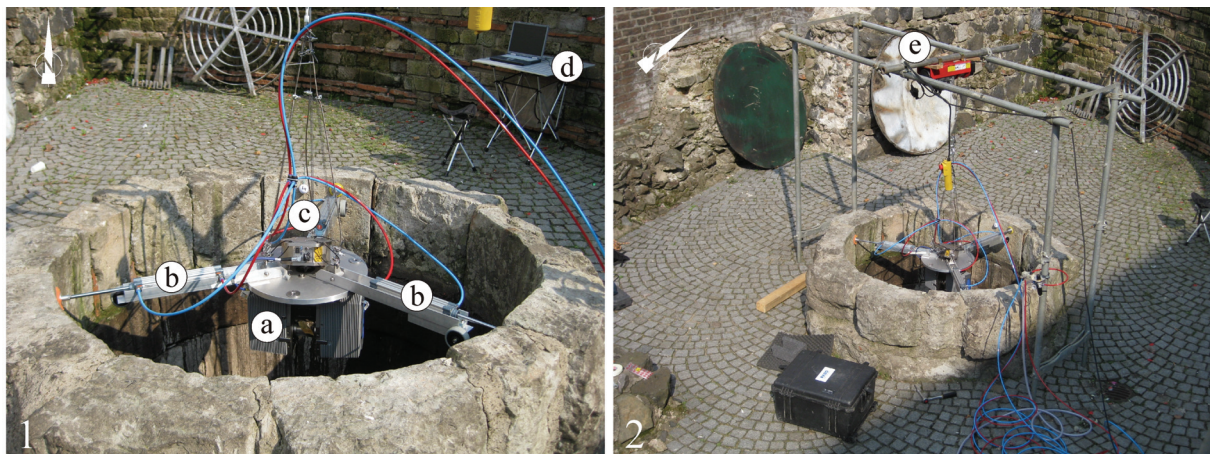


Abbildung 5.39: (1) Spezielle Haltevorrichtung des Laserscanners für die Vermessung des Brunnens. (2) Aufbau während der Messkampagnen in der Apsis (Photos: Hinzen, 2010).

Auf der Aluminiumplatte wurde der Scanner zentral, kopfüber montiert und über die elektrische Winde in den Brunnen abgesenkt. Die pneumatischen Zylinder konnten die gesamte Konstruktion in der gewünschten Arbeitstiefe durch Anpressen an die Brunnenwand fixieren. Aufgrund der schmalen Form des Brunnens wurde ein Abstand von ca. 1 m zwischen den einzelnen Scans gewählt (Abb. 5.40). Der Brunnen wurde in zwei Messkampagnen mit insgesamt 20 Scans vermessen.

Die erste Messkampagne musste in einer Höhe von ca. 42 m ü.NN abgebrochen werden. Ab dieser Tiefe zeigt der Brunnen starke Deformationen, die den Schacht stark einengen. Die konstruierte Haltevorrichtung musste diesen reduzierten Durchmessern angepasst werden. Nach dem Umbau der Vorrichtung war es möglich Bauwerke mit einem Durchmesser von 1.1–1.9 m zu kartieren.

In der zweiten Messkampagne konnte so der gesamte Brunnen dokumentiert werden. Insgesamt wurden so 338 Blöcke in 33 Lagen kartiert. Bei der Auswertung der Daten fiel auf, dass gegenüber der Grabungsdokumentation drei Blocklagen fehlten und sich eine Tiefen-diskrepanz von ca. 0.7 m zeigte. In der Zeit zwischen der Ergrabung der Brunnenfüllung und

der ersten Scankampagne lagen ca. 10 Monate. In diesem Zeitraum hat sich im Brunnen knapp 1 m³ Sediment abgelagert und die untersten Blocklagen verdeckt. Die Zufuhr des Sedimentes muss größtenteils über das Grundwasser erfolgt sein, da der Brunnen, aufgrund der Abflussänderung im Zuge der Grabungen, kaum noch Oberflächenwasser aufnimmt. Die Tatsache, dass die Grabung im Brunnen abgebrochen wurde, da große Mengen eines Sand-Wasser-Gemisches eindringen spricht für den Sedimenteintrag über das Grundwasser.

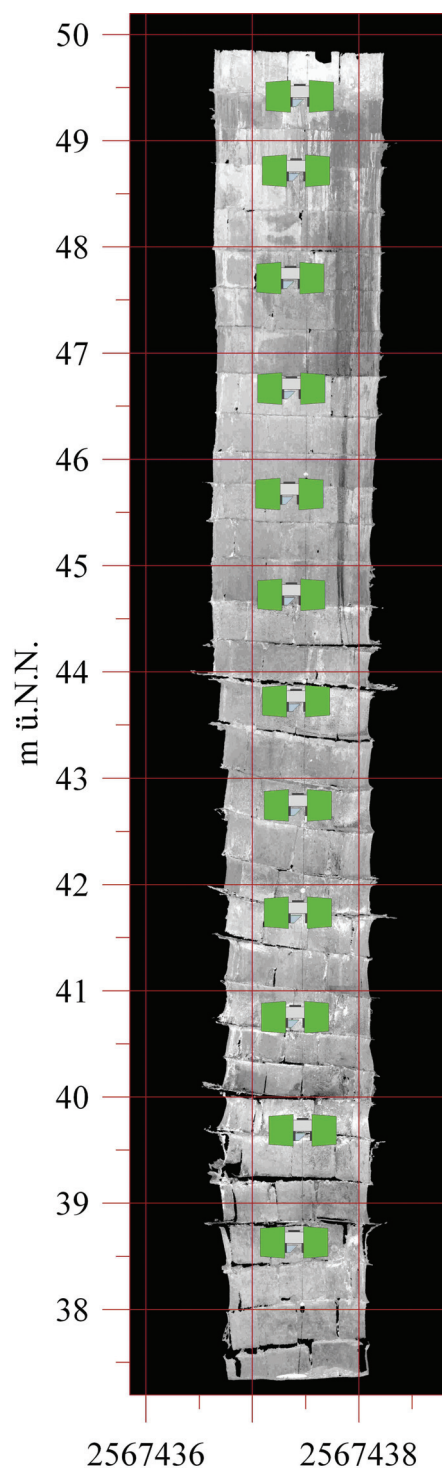


Abbildung 5.40: Tiefenlagen der einzelnen Scans bei der Vermessung des römischen Brunnens in der Apsis.

SCHÄDEN

In der Apsis konnten zwei Schadensbereiche näher untersucht werden. Nach den Grabungen in der Apsis konnte ein Teilbereich der Hangstützmauer mit trigonalen Stützmauern aus den ersten Bauperioden der Apsis sowie Fundamentreste aus den Bauphasen mit massiver Tuffarchitektur erfasst werden. Diese Konstruktionen zeigten Neigungen sowie verschiedene Brüche bzw. Risse. Abbildung 5.41 zeigt einen Überblick über die Apsis und die beschädigten Strukturen.

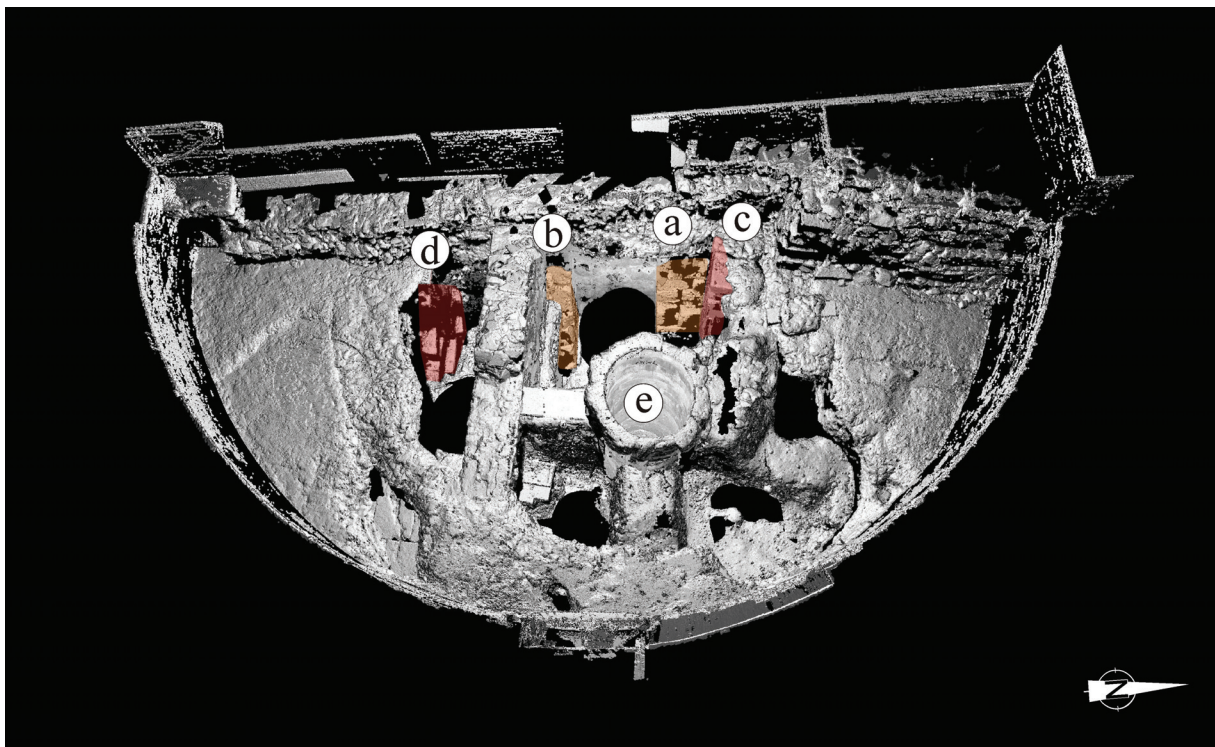


Abbildung 5.41: 3D Punktwolke der Apsis mit den untersuchten Bereichen (a+b) Trigonalen Stützmauern, (c+d) Fundamentreste, (e) Brunnen.

Die Stützmauern der Hangverstärkung zeigen an der nördlichen Wand Neigungen bis zu 4.4° in Richtung Osten. Im Mittel liegen die Neigungen bei $2.4^\circ \pm 1.5^\circ$. Die südliche Stützmauer zeigt Neigungen bis zu 5.9° in Richtung Osten. Im Mittel liegen diese bei $2.6^\circ \pm 1.6^\circ$. Ein Block der südlichen Stützwand ist um 3.4° in Richtung Westen geneigt. Nördlich der Stützwand konnten Teile eines massiven Tufffundamentes vermessen werden. In diesem Bereich treten im Mittel Neigungen von $5.1^\circ \pm 3.1^\circ$ in Richtung Osten auf. Der Maximalwert liegt bei 10.5° . In einer benachbarten Grube im Süden konnten die Reste einer weiteren Fundamentmauer vermessen werden. Hier liegen die Neigungen im Mittel bei $3.6^\circ \pm 1.6^\circ$ in Richtung Osten. Der Maximalwert liegt bei 6.5° .

In den genannten Strukturen wurden zudem mehrere Risse nachgewiesen. Die nördliche Stützmauer zeigt einen Riss mit einer Öffnungsweite von 0.019 m der mit 58° nach Westen einfällt. In der südlichen Stützmauer sind drei Risse mit Öffnungsweiten von im Mittel $0.02 \text{ m} \pm 0.005 \text{ m}$ nachgewiesen worden die im Mittel mit $76.8^\circ \pm 10.7^\circ$ nach Westen einfallen. Ein Riss mit einer Öffnungsweite von 0.006 m fällt mit 79° nach Osten ein. An den Fundamentresten konnte nur im südlichen Bereich ein Riss nachgewiesen werden, der mit 56.4° nach Osten einfällt. Der Öffnungsbetrag konnte aufgrund von Abschattungseffekten in

der Punktwolke nicht bestimmt werden. Abbildung 5.42 zeigt die Auswertung der Orthophotos der Punktwolke.

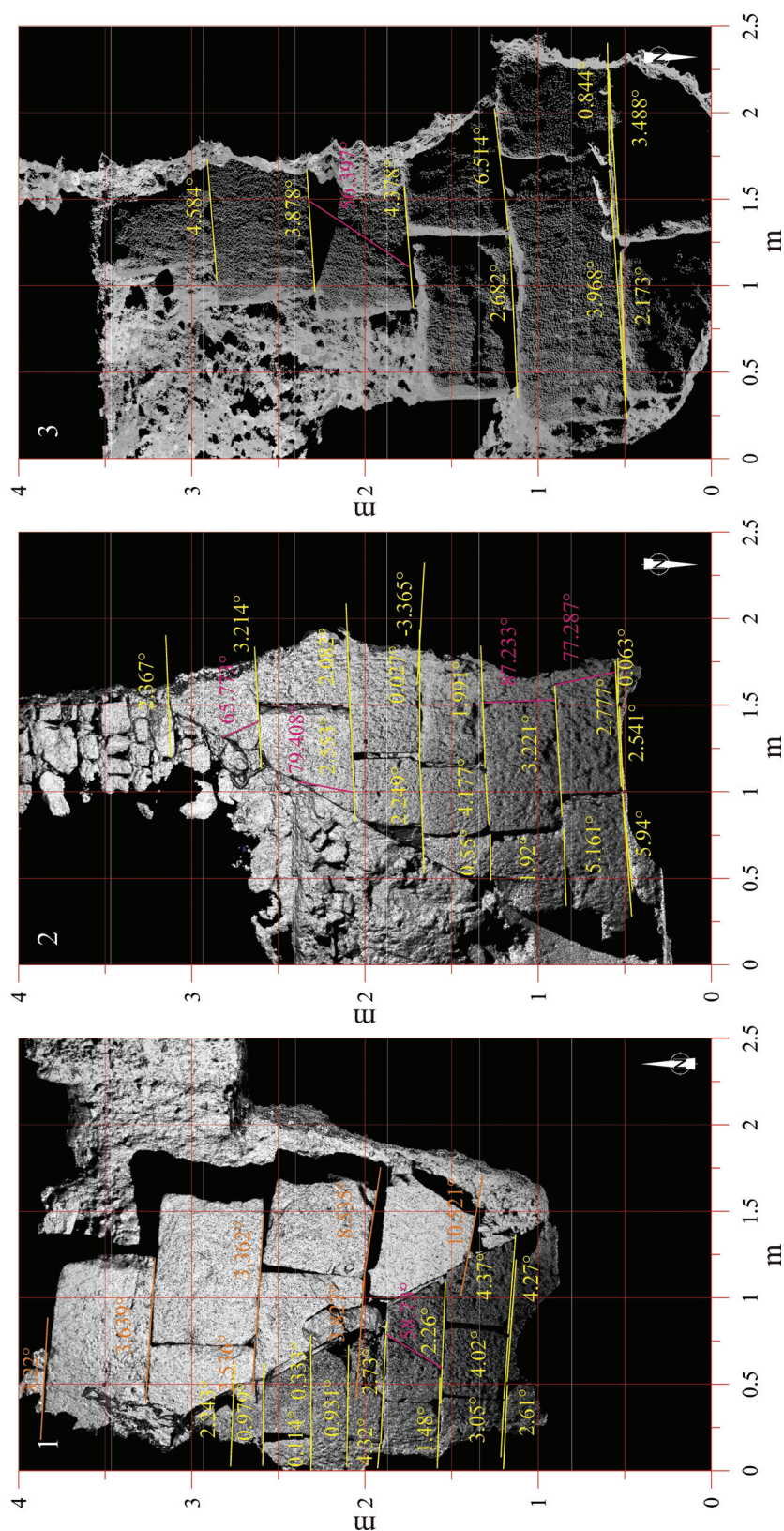


Abbildung 5.42: Auswertungen der Orthophotos der nördlichen, trigonalen Stützmauer (gelb) und den dahinter liegenden Fundamentresten (orange) (1), der südlichen Stützmauer (2) sowie der südlichen Fundamentreste (3).

Die Deformationen im Brunnen wurden mit der in Kapitel 4.8 beschriebenen Methode quantifiziert. Über die Flächennormalen von virtuellen Frontflächen konnten Rotationen und Neigungen der einzelnen Blöcke bestimmt werden. Abbildung 5.43 zeigt einen Überblick über die Rotationen und Neigungen im Brunnen. Teile der Ergebnisse der Untersuchung des Brunnens wurden 2010 von Fleischer et al. veröffentlicht.

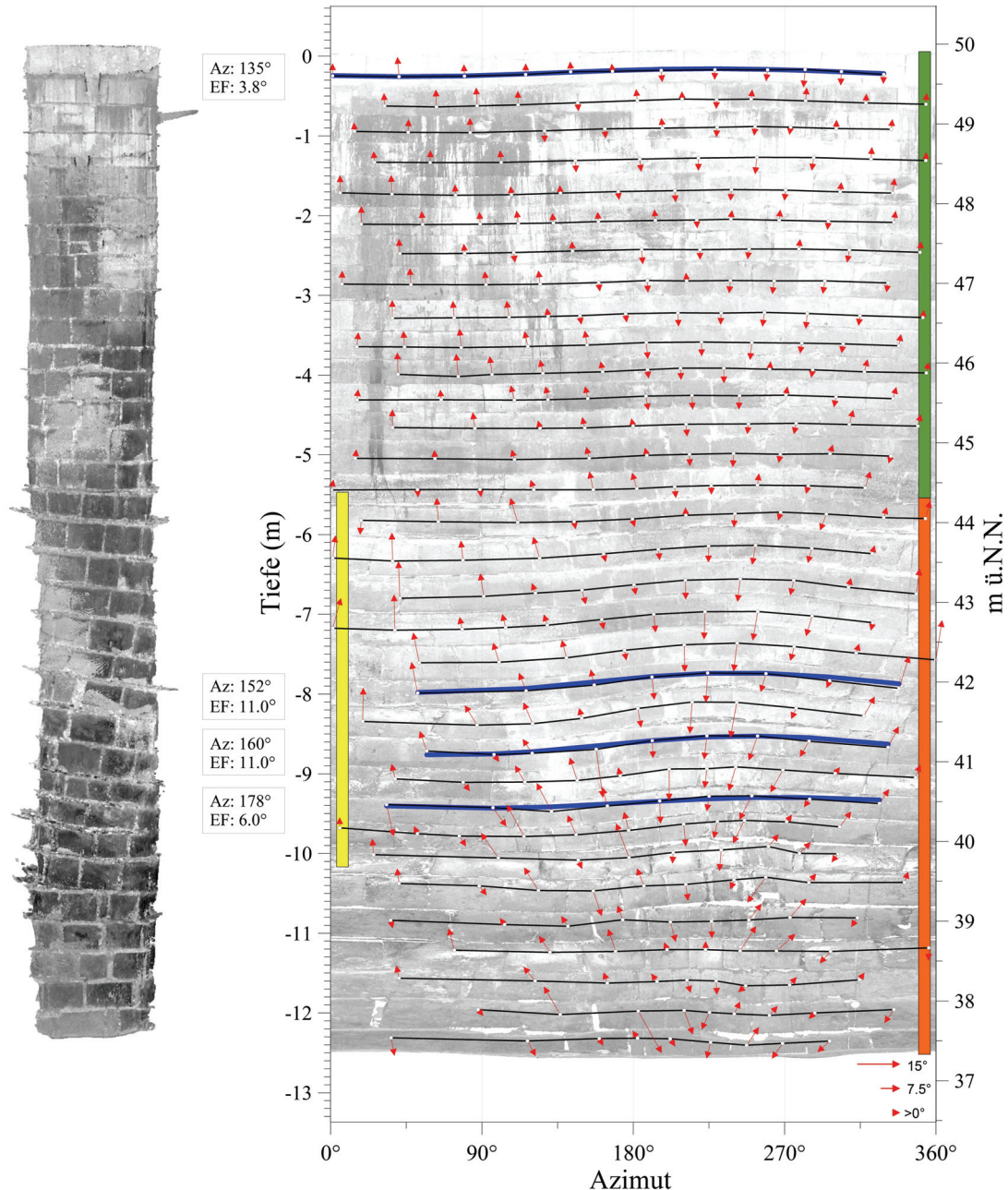


Abbildung 5.43: Links: Punktwolke aus 12 Einzelscans des Brunnens mit Blickrichtung nach Norden. Rechts: Darstellung der Lage der einzelnen Blöcke über der abgerollten Punktwolke. Die weißen Punkte zeigen die Mittelpunkte der berechneten Flächen zur Lagebestimmung. Die schwarzen Linien verbinden diese und zeigen so die Lage der gesamten Blocklage. Die Vektoren zeigen Stärke und Richtung der Neigungen der einzelnen Blöcke. Die blauen Linien geben berechnete Raumlagen für einzelne Blocklagen an. Links sind die Einfallrichtung (Az) und der Einfallwert (EF) aufgetragen. Die farbigen Balken markieren den reparierten Bereich (grün), den deformierten Bereich (orange) und die Hauptschadenszone (gelb)(erweitert nach Fleischer, et al., 2010).

Im deformierten Bereich ab einer Tiefe von ca. 5 m weisen die einzelnen Blöcke im Mittel eine Neigung von $4.1^\circ \pm 3.2^\circ$ auf. Einzelne Blöcke sind hierbei um bis zu 15.8° geneigt. Im Bereich der Deformationen sind die einzelnen Blöcke im Mittel um $19.0^\circ \pm 12.5^\circ$ aus dem Verbund gedreht. Die Neigungsrichtung der einzelnen Blöcke folgt je nach Lage auf dem Durchmesser des Brunnens der Gesamtneigung der einzelnen Blocklagen Richtung SSE. Im Bereich der stärksten Deformationen in einer Tiefe von 8 bis 10 m unter der Brunnenoberkante neigen sich die kompletten Blocklagen zwischen 6° und 11° in Richtungen zwischen 152° und 178° . Die Schäden im Brunnen korrelieren in ihrer Richtung mit denen in der Kloake im Synagogenbereich. Wie schon im Bereich des Praetoriums und der Porticus deuten die Schäden auf eine hangabwärtige Bewegung des Untergrundes.

5.3.3 Synagoge und Kloake

EINLEITUNG

Historische Quellen belegen die Existenz einer jüdischen Gemeinde in Köln für das Jahr 321 n. Chr. (Baltrusch, 2002). Kaiser Konstantin erlaubte in einer *lex generalis* die Berufung von Juden in die Kurie (Schütte und Gechter, 2011). Damit ist die jüdische Gemeinde von Köln die älteste belegte nördlich der Alpen. Für Trier und Mainz wird jedoch, trotz der fehlenden Belege für diesen Zeitraum, die Existenz von Gemeinden angenommen. Die Berufung von Personen in die Kurie setzt eine gewisse Bedeutung einer Gemeinschaft in der Stadt voraus. Schütte und Gechter (2011) schließen daraus, dass die Gemeinde bereits eine längere Entwicklung durchlaufen haben muss, um diesen Status zu erreichen.

Bauliche Überreste des jüdischen Viertels wurden schon in den 1950er Jahren, bei den ersten Grabungen im Bereich des Rathausplatzes durch Doppelfeld (1959) gefunden. Die damalige Grabungssituation erschwerte die genaue Zuordnung der Befunde zu verschiedenen Bauphasen, so dass erst die Grabungen zur Archäologischen Zone eine detaillierte Einteilung ermöglichen. Sicher nachgewiesen ist eine Synagoge für die Zeit nach 800 (Schütte und Gechter, 2011). Befunde belegen jedoch die Existenz eines antiken Gebäudes an gleicher Stelle, dessen Nutzung jedoch noch nicht abschließend geklärt ist (Abb. 5.44). Teile dieses Gebäudes (z.B. ein Wasserbecken) wurden im Mittelalter in der Synagoge weiter verwendet. Dies legt eine Nutzung als Synagoge vor 800 nahe.

BAUGESCHICHTE

Die ältesten Befunde im Bereich der Synagoge belegen ein West-Ost ausgerichtetes Gebäude mit drei Flügeln, auf dem Rathausplatz für den Anfang des 4. Jahrhunderts (Abb. 5.44). Der Grundriss des zentralen Raumes dieses antiken Gebäudes deckt sich weitestgehend mit dem Grundriss der mittelalterlichen Synagoge.

Im zentralen Gebäudeteil wurde ein Wasserbecken gefunden das auf die erste Hälfte des vierten Jahrhunderts datiert wurde. Dieses Wasserbecken wurde nicht abgedichtet, so dass Regenwasser, das über einen Zulauf in das Becken gelangte, langsam hindurchsickern konnte. Dies wird als Beleg für „lebendes Wasser“ nach dem jüdischen Glauben angesehen (Schütte und Gechter, 2011). Das Becken weist Reparaturspuren aus dem beginnenden neunten Jahrhundert sowie eine Erweiterung aus dem 14. Jahrhundert auf. Diese Spuren sind ein Beleg für die weitere Nutzung im mittelalterlichen Synagogenbau. Die axiale Lage zusammen mit der späteren Bimah spricht für die kultische Nutzung des Beckens. Die Deutung als Becken mit religiöser Bedeutung schließt eine andere Nutzung für den Zeitraum davor nahezu aus, da z.B. ein gewöhnlicher Wasserspeicher sicher nicht für religiöse Zwecke weiterverwendet wurde.

Im Norden und Süden des zentralen Raumes schlossen sich hypocaustierte Flügelbauten an, deren Reste jedoch nur im nördlichen Bereich erhalten sind. Die Hypocaustanlage (Fußbodenheizung) im nördlichen Bereich belegt eine Zerstörung und Reparatur um 800.

Im Nordosten des zentralen Raumes findet sich im Untergrund der späteren Frauensynagoge ein antikes Gussfundament, dessen Zweck bislang nicht geklärt werden konnte.

Der Grundriss des zentralen Raumes und damit der mittelalterlichen Synagoge blieb bis in die Zeit der Ratskapelle Mitte des 20. Jahrhunderts erhalten. Vermutlich nach 800 wurde im Nordosten des Gebäudes eine Frauensynagoge errichtet. In der Zeit zwischen 800 und der endgültigen Aufgabe als Synagoge kam es durch die wiederholten Pogrome immer wieder zur Teilzerstörung des Gebäudes. Um 1426 wurde das Gebäude zur Ratskapelle umgeweiht, womit die mindestens 600 jährige Nutzung als Synagoge beendet wurde. Eine detaillierte Beschreibung der Geschichte der Synagoge kann der Veröffentlichung von Schütte und Gechter (2011) entnommen werden.

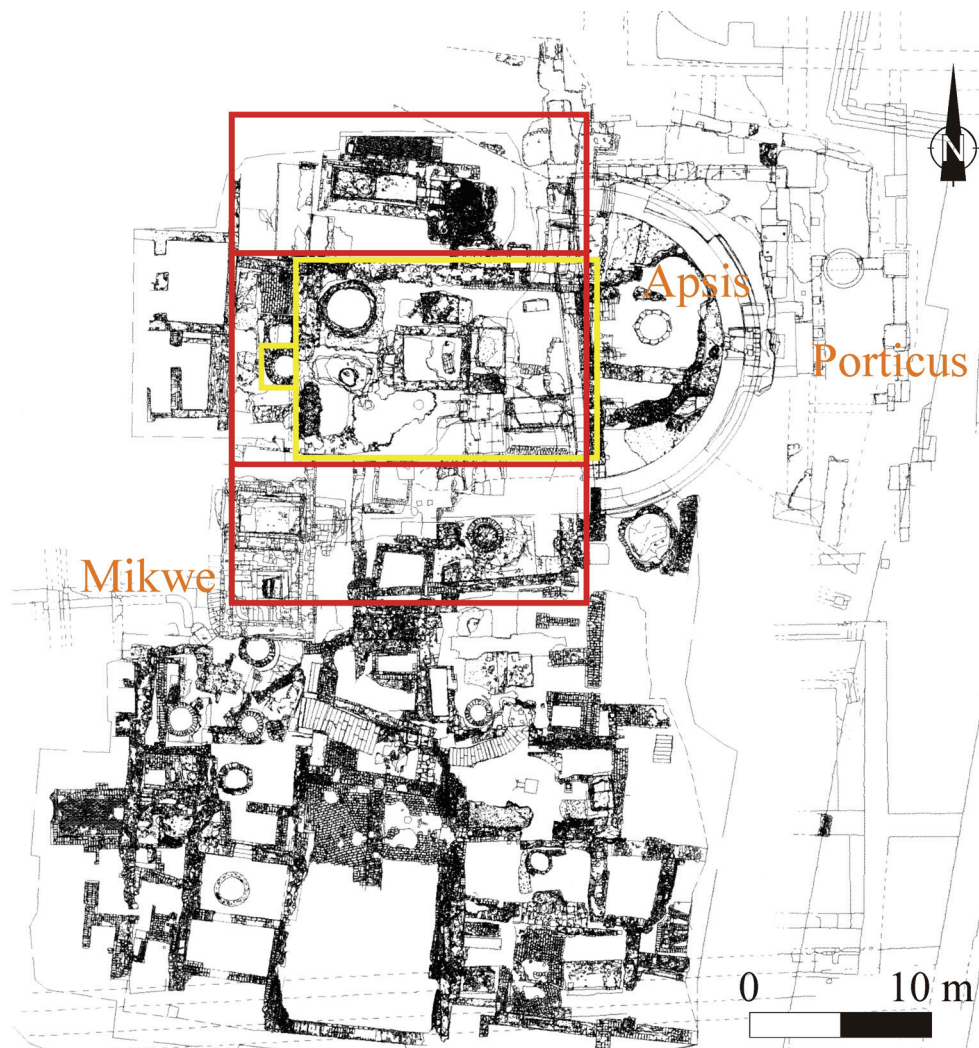


Abbildung 5.44: Grundriss der mittelalterlichen Synagoge (gelb) und des antiken Vorgängerbaus (rot) (nach Schütte und Gechter, 2011).

BAUBESCHREIBUNG

Die komplexe Baugeschichte der Synagoge zeigt nur in wenigen Bereichen zeitlich zusammenhängende, ungestörte Strukturen. Im Zuge der Schadensuntersuchungen wurden drei Bereiche detailliert bearbeitet: Der Bereich des Hypocaustfussbodens unter dem nördlichen Flügel des antiken Gebäudes, die mittelalterliche Kloake in der Nordwest-Ecke der mittelalterlichen Männersynagoge sowie die antiken und mittelalterlichen Befunde unter der Frauensynagoge. Für diese Bereiche wird im Folgenden eine Baubeschreibung gegeben.

HYPOCAUSTANLAGE

Bei einer Hypocaustanlage handelt es sich um eine römische Warmluftheizung. Der Fußboden wird hierbei von rechteckigen oder runden Pfeilern aus Tonziegeln getragen. In den Zwischenräumen dieser Konstruktion konnte Warmluft zirkulieren, die über Heizstellen (Praefurniae) erwärmt wurde.

Die Hypocaustanlage im nördlichen Flügel des antiken Gebäudes auf dem Rathausplatz wurde über einem Estrich aus dem ersten Jahrhundert errichtet. Die unterste spätantike Phase beginnt mit einem Estrich, auf dem die Ziegel der eingestürzten Hypocaustpfeiler liegen. Darüber folgen die Reste des Oberbodens der Hypocauste und der ehemalige Bodenbelag. Diese Zerstörungsschicht wurde in karolingischer Zeit durch eine Planierschicht ausgeglichen und mit einem Reparaturboden überdeckt (Schütte und Gechter, 2011). Im Untergrund der Abfolge konnte der gewachsene Boden nachgewiesen werden. Kap. 6.1.3 beschreibt die Untersuchung dieser Sedimente. Eine ^{14}C -Datierung an einem Holzkohlerest aus der obersten Schicht des anstehenden Bodens ergab ein Alter von 1142 – 971 RCYBP (Radiokarbon Jahre vor heute, Referenzjahr:1950; nach Stuiver und Polach, 1977). Dies steht im Widerspruch mit den archäologischen Datierungen und ist nur mit einem Eintrag während der Reparaturphase zu erklären. Abbildung 5.45 zeigt den Aufbau des Profils durch die ehemalige Hypocaustanlage.

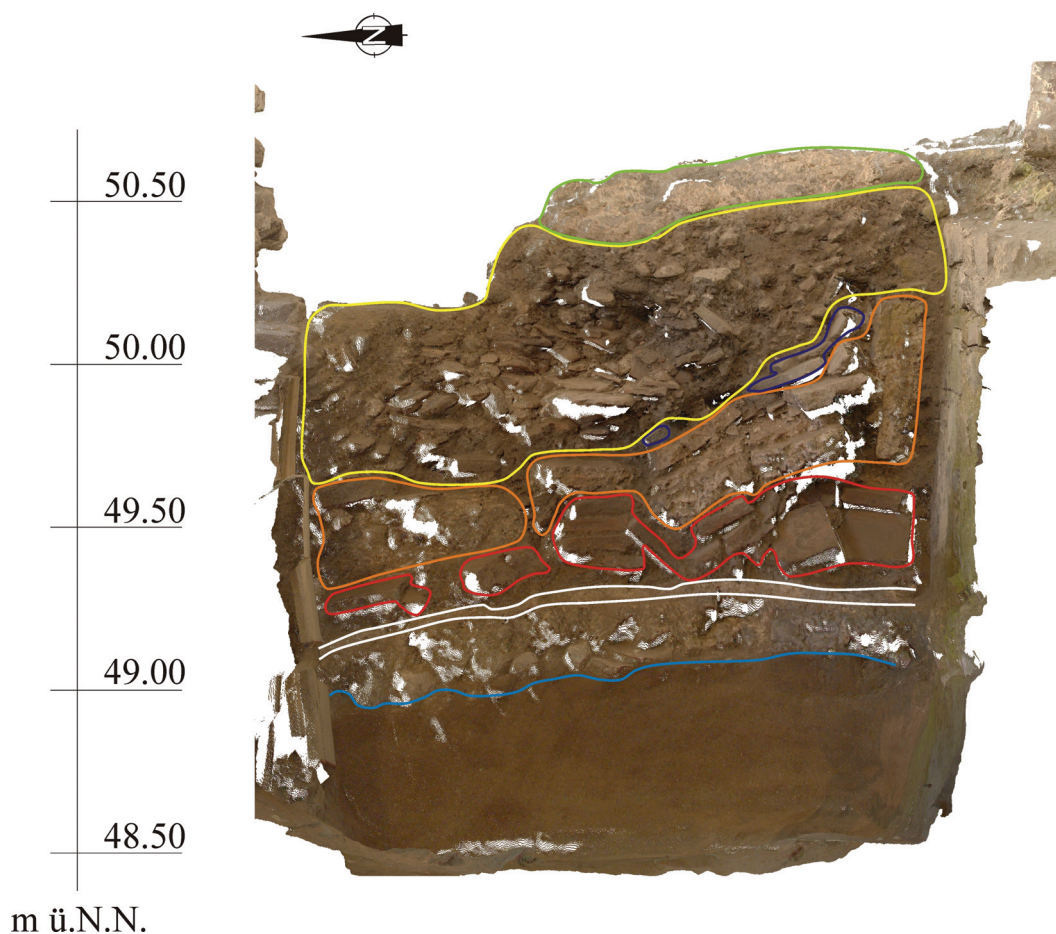


Abbildung 5.45: Ansicht der 3D Punktwolke des Untergrundes des nördlichen Flügelbaus des antiken Gebäudes. Blau: Grenze zum gewachsenen Boden, Weiß: Spätantiker Estrich, Rot: Hypocaustziegel, Orange: Reste des eingestürzten Oberbodens, Violett: Bodenbelag, Gelb: Planierschicht aus karolingischer Zeit, Grün: Reparaturboden aus karolingischer Zeit (nach Schütte und Gechter, 2011).

KLOAKE

Die untersuchte Kloake zeigt einen Nutzungszeitraum von der ersten Hälfte des 10. Jahrhunderts bis zum Ende des 14. Jahrhunderts. Die Kloake befindet sich in der Nordwest-Ecke der Synagoge, was eine ungewöhnliche Lage für eine derartige Einrichtung darstellt. Die Kloake lag jedoch unter einem Treppenaufgang zum Wohnbereich über der Synagoge, welcher einen separaten Eingang besaß. Damit ist die Kloake Teil der Wohnung über der Synagoge, die vermutlich von einer hochrangigen Person der jüdischen Gemeinde bewohnt wurde. Die Kloake lag unter dem Fußbodenniveau der eigentlichen Synagoge, wodurch eine zusätzliche Abgrenzung zum religiösen Gebäude gegeben ist. Die Kloake wurde in zwei Phasen errichtet (Schreiber et al., 2011). Die Nutzung in der ersten Phase dauerte bis zu den Pestpogromen 1349. Mit dem Wiederaufbau der Synagoge 1372 kam es auch zu einem Umbau der Kloake und dem Einbau eines Zulaufes.

Die zylinderförmige Kloake mit einem Durchmesser von 2.3-2.5 m wurde nach der zweiten Bauphase von einer Kuppel verschlossen, in die ein mit Schiefer ausgekleideter Schacht aus dem ersten Stockwerk mündete. Von diesen Strukturen sind nur noch Reste der Kuppel sowie der in die Kloake integrierte Mündungsbereich des Fallschachtes (0.4 x 0.9 m) erhalten. Die Kloake ist insgesamt 8.3 m tief und kann ein Materialvolumen von 32.1 m³ aufnehmen. Diese Größe erscheint im Vergleich zu anderen „großen“ Kloaken aus dieser Zeit, welche ein maximales Volumen von 25 m³ haben, außergewöhnlich groß (Schütte, 1986). Die Größe der Konstruktion ist durch die Tatsache zu begründen, dass die Kloake aufgrund ihrer Lage unterhalb des Treppenturmes nicht regelmäßig geleert werden konnte und daher genügend Kapazität für einen langen Zeitraum haben musste. Die Konstruktion wird aus 60-70 Lagen von kleinen Tuffblöcken (0.1 x 0.15 m) aufgebaut. Im westlichen Bereich zeigen sich in einer Tiefe von 1.7 m unter der Oberkante Abweichungen von diesem Konstruktionsschema. Hier wird die Wand aus größeren, unregelmäßig geformten Tuffblöcken (0.2 x 0.3 m) und Teilen hexagonaler Basaltsäulen aufgebaut. In einer Tiefe von 3.5 m beginnt eine Zone, die starke Deformationen und Schäden zeigt. Dieser Schadensbereich wird im Abschnitt „Schäden“ behandelt. Abbildung 5.46 zeigt die Lage der Kloake innerhalb der Befunde auf dem zentralen Rathausplatz.



Abbildung 5.46: Lage der Kloake im Grabungsbereich auf dem zentralen Rathausplatz (1) und Blick aus der Kloake (2).

GRUBE UNTER DER FRAUENSYNAGOGE

Im Zuge der Ausgrabung einer Grube mit Schutt des Pestpogromes von 1349, im Bereich der Frauensynagoge wurden im Untergrund einer Nord-Süd verlaufenden Mauer Reste eines Gussfundamentes aus vermutlich antiker Zeit freigelegt (Abb. 5.47).

Aus archäologischer Sicht ist sowohl die Datierung des Gussfundamentes als auch des darüber liegenden Mauerwerks ungeklärt. Derzeit wird eine Probe aus dem Bereich des Fundamentes datiert. Über der gegossenen Struktur beginnt die Aufmauerung aus unregelmäßigen Blöcken aus unterschiedlichsten Materialien. Sowohl das Fundament, als auch das aufgehende Mauerwerk zeigen strukturelle Schäden wie Neigungen und Risse.

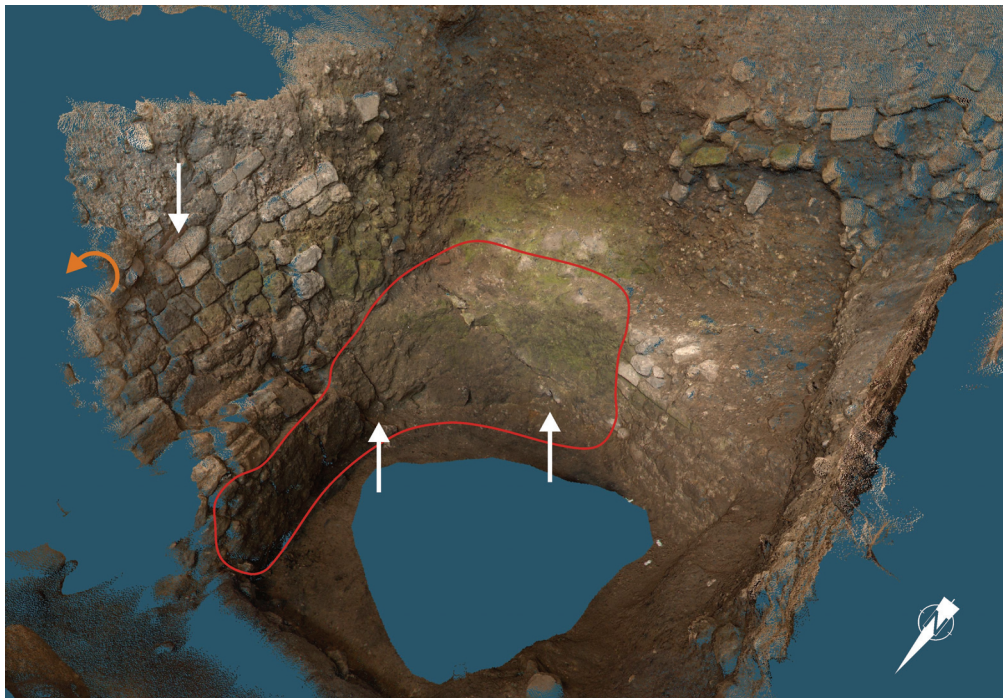


Abbildung 5.47: 3D Punktwolke der Fundament- und Mauerreste im Untergrund der Frauensynagoge. Die rote Linie markiert das Gussfundament. Die weißen Pfeile markieren Risse, der orange Pfeil die Neigung der Mauer nach Osten.

KARTIERUNG

Der Bereich der Hypocaustanlage bzw. das Profil an der Hypocauste wurde mit drei Scans kartiert. Da gerade der Übergang zum gewachsenen Boden sehr nahe an der Geländeoberfläche liegt, wurde einer der Scans ohne das im Normalfall verwendete Stativ durchgeführt. Hierbei wurde der Scanner nur auf dem darunter liegenden Akku platziert und grob ausgerichtet. Auf diese Weise kann der Scanner knapp über dem Bodenniveau betrieben werden (Abb. 5.48). Die grobe Horizontierung des Gerätes wird über das interne Inklinometer ausgeglichen. Im Fall der Hypocaustanlage wurde der vorliegende Schaden nicht quantifiziert da aufgrund der Einbindung in die Planierschicht und der Lage unter einem Reparaturboden nicht sichergestellt ist, dass sich der Schaden im Originalzustand befindet.



Abbildung 5.48: Scanner vor dem Profil an der Hypocauste im Einsatz ohne Stativ.

Die Kartierung der Kloake fand in 11 Einzelkampagnen statt bei denen insgesamt 15 Scans durchgeführt wurden (Abb. 5.49).

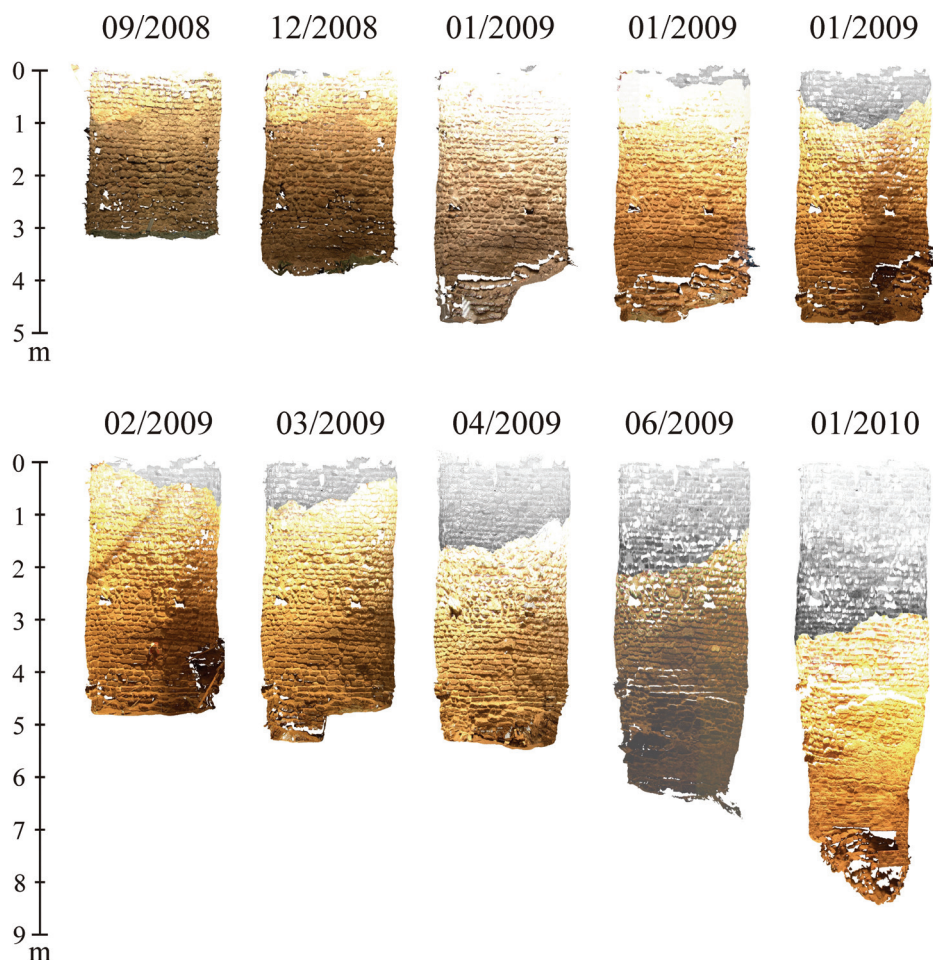


Abbildung 5.49: 3D Punktwolken der nördlichen Hälfte der Kloake aus zehn einzelnen Messkampagnen. Dargestellt ist der Originalzustand.

Zu Beginn der Ausgrabung war nicht klar welche Tiefe die Konstruktion erreicht. In einer Ausgrabungstiefe von ca. 3.2 m stellte sich heraus, dass die Kloake Schäden aufweist und eine weitere Ergrabung ohne vorherige Restaurierung nicht möglich ist. Die Kloake konnte also nicht im Originalzustand erhalten werden. Um den Originalzustand dennoch dokument-

ieren zu können, wurde der 3D Laserscanner eingesetzt. In einer Grabungstiefe von 3.2 m wurden die ersten beiden Scans vor Beginn der Restaurierungsarbeiten durchgeführt. Im weiteren Verlauf wurden 1.0-1.5 m Abschnitte der Füllung ergraben, im Anschluss mit dem Scanner dokumentiert und danach restauriert. Auf diese Weise konnte die gesamte Struktur bis auf eine Tiefe von 6.0 m im Originalzustand dokumentiert werden. Der Bereich von 6.0 m bis zur Endtiefe von 8.3 m musste aufgrund der statischen Instabilität direkt während der Ausgrabung restauriert werden und konnte daher nicht im Originalzustand dokumentiert werden. Abbildung 5.49 zeigt die Punktwolken der jeweiligen Grabungsstände.

Bei jeder weiteren Scankampagne wurde der zuvor im Originalzustand dokumentierte Bereich erneut im restaurierten Zustand mit aufgezeichnet. Auf diese Weise konnten im Nachgang der Scankampagnen restaurierte Bereiche bzw. Bereiche im Originalzustand aus den Punktwolken ausgeschnitten werden und zu Komplettdmodellen des Originalzustand und des restaurierten Zustandes zusammengefügt werden. Das Modell der Kloake im Originalzustand (im weiteren Modell O) besteht aus zehn Punktwolken mit insgesamt 134 Millionen Punkten, das Modell der Kloake nach der Restaurierung (im weiteren Modell R) aus sieben Punktwolken mit 161 Mill. Punkten. Abbildung 5.50 zeigt die beiden Modelle im Vergleich.

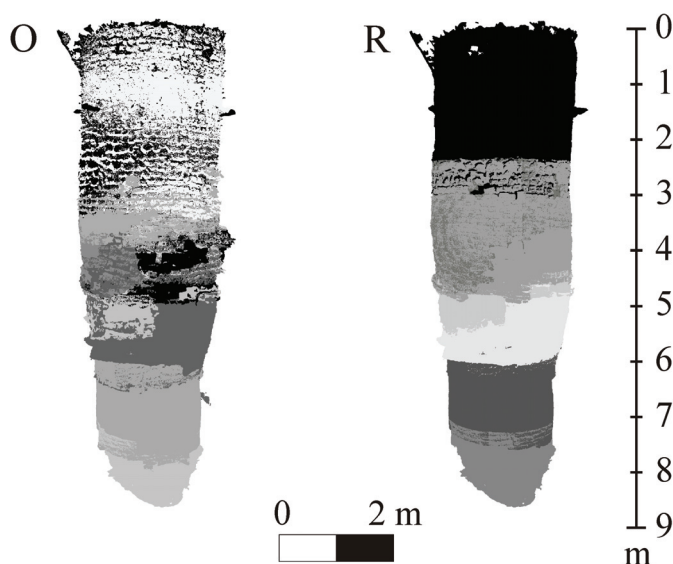


Abbildung 5.50: Virtuelle Modelle der Kloake. (Links) Modell O, (Rechts) Modell R (Ansicht von Aussen). Die Graustufen zeigen die einzelnen Punktwolkenbereiche, die für die Modellerstellung verwendet wurden.

Um die Unterschiede zwischen den beiden Modellen darzustellen und so den Umfang der Restaurierungsarbeiten verdeutlichen zu können, wurde eine Inspektionsrechnung durchgeführt. Abb. 5.51 zeigt die Ergebnisse der Inspektionsrechnung für verschiedene Entfernungsbereiche.

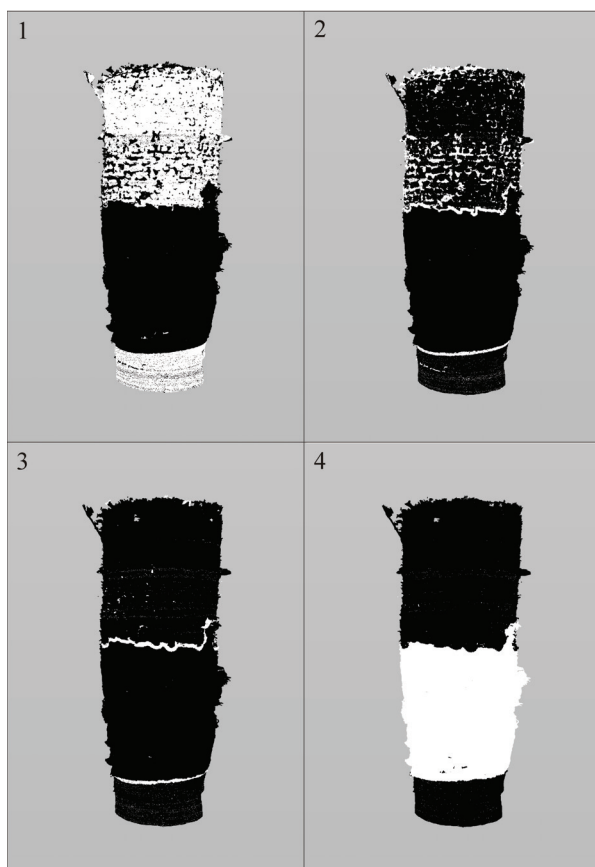


Abbildung 5.51: Ergebnisse der Inspektionsrechnung zwischen Modell O und Modell R. Die weißen Bereiche zeigen Abweichungen zwischen beiden Modellen in verschiedenen Entfernungsbereichen. (1) 0.00-0.01 m, (2) 0.010-0.075 m, (3) 0.075-0.1 m, (4) >0.15 m.

Für die Inspektionsrechnung wurde aus den Punktwolken, die nach der Restaurierung aufgenommen wurden ein Gitternetzmodell mit 17.7 Millionen Maschen, die mit 9.2 Millionen Knoten verknüpft sind, berechnet. Diese große Anzahl der Maschen und Knoten war nötig um ein möglichst genaues Abbild der Oberfläche der Punktwolke zu erhalten. In der Inspektionsrechnung wurde der Abstand der Punkte von Modell O zu der Oberfläche des Gitternetzes aus Modell R berechnet.

Abbildung 5.52 gibt einen Überblick über die Scannerstandorte im Bereich des Grabungszeltes, in dem auch die Hypocaustanlage, die Kloake und die Befunde unter der Frauensynagoge liegen.

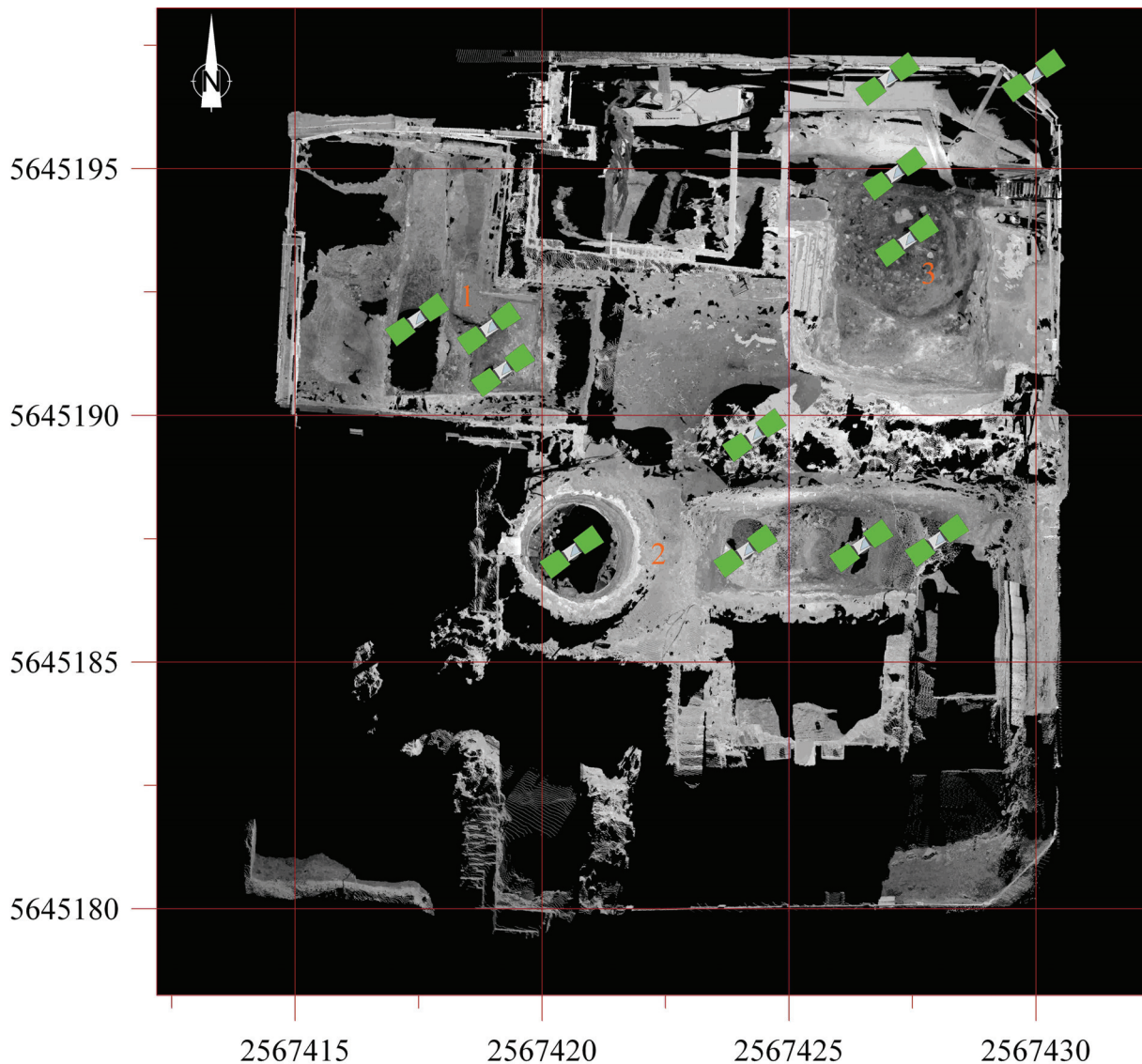


Abbildung 5.52: Standorte des Scanners bei der Kartierung der Befunde im Grabungszelt. (1) Hypocaustanlage, (2) Kloake, (3) Grube unter der Frauensynagoge.

SCHÄDEN

Wie zuvor beschrieben wurden die Schäden an der Hypocaustanlage als Gesamtschadensbefund betrachtet, der nicht weiter quantifiziert werden konnte, da er vermutlich anthropogen überprägt ist. Auffallend ist jedoch, dass der spätantike Estrich unter der zusammengestürzten Hypocaustanlage im nördlichen Bereich um bis zu 12° geneigt ist. Zusammen mit den kollabierten Hypocaustpfeilern deutet dies auf eine Bewegung im Untergrund des nördlichen Flügels des Gebäudes hin.

Die Schäden an der Kloake wurden mit zwei Verfahren untersucht. Zunächst wurde die Deformation der Gesamtkonstruktion untersucht. Dies wurde für die obersten 6 m der Kloake durchgeführt, da für den darunter liegenden Bereich keine Daten des Originalzustandes vorlagen. Um die Abweichung der Form der Kloake von einer Idealform darzustellen, wurde wie schon in Kapitel 4.8 beschrieben ein idealer Zylinder an die Oberfläche der Punktwolke angepasst. Dieser Zylinder mit einem Durchmesser von 2.38 m wurde vor der Berechnung verkleinert um nur positive Entfernungswerte zu erhalten und in ein Gitternetzmodell

umgewandelt. In einer Inspektionsrechnung wurden die Abstände der Punktwolke von der Oberfläche des Gitternetzzyllinders berechnet. Abbildung 5.53 zeigt die Ergebnisse der Berechnung für die oberen 6 m der Kloake in Bezug zu dem ursprünglich berechneten Zylinder mit einem Durchmesser von 2.38 m.

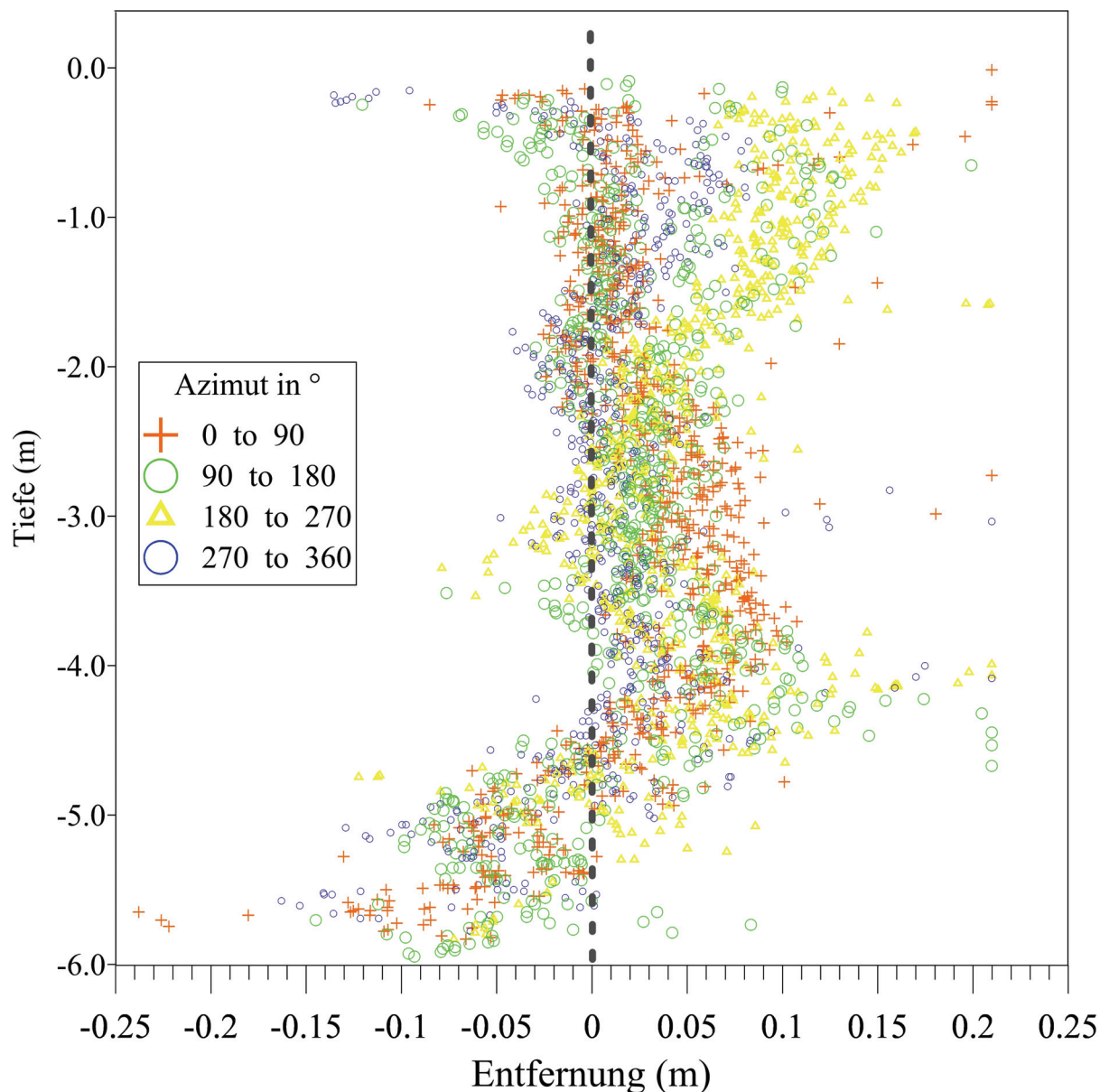


Abbildung 5.53: Abweichungen der Punktwolke der Kloake von der Oberfläche eines Zylinders mit einem Durchmesser von 2.38 m (graue Linie). Die Symbole zeigen den Azimut der jeweiligen Punkte. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nur 0.1% der berechneten Punkte eingezeichnet. Negative Entfernungswerte liegen innerhalb des idealen Zylinders, positive außerhalb.

Die großen Abweichungen zwischen +0.08 m und +0.2 m in einem Tiefenbereich von 3.5-4.5 m und zwischen -0.05 m und -0.15 m in einem Tiefenbereich von 4.5-6.0 m zeigen die starken Deformationen in der Hauptschadenszone.

In einer Tiefe von 4.0 m zeigen sich große Abweichungen außerhalb des idealen Zylinders. In diesem Bereich ist die Gesamtkonstruktion in einen oberen und unteren Bereich zerbrochen.

Der entstandene Riss führte dazu, dass der Scanner bei der Vermessung in diesem Bereich Punkte des eigentlich hinter der Wand liegenden anstehenden Bodens vermessen hat. Die Abweichungen in einer Tiefe zwischen 0 m und 0.5 m resultieren von den Resten der Kuppel und des Einlasses in die Kloake.

Im Tiefenbereich zwischen 3.0 m und 5.0 m wurde die Hauptschadenszone mit der gleichen Methode untersucht, die auch bei der Untersuchung des römischen Brunnens angewendet wurde. Für 348 Blöcke in acht Blocklagen wurden virtuelle Flächen an die Frontseiten der Blöcke angepasst und über deren Flächennormale die Lage im Raum bestimmt. Abbildung 5.54 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung.

Die Untersuchung zeigte, dass 63% der Blöcke (243 Blöcke) nach innen geneigt sind, während 38% der Blöcke (141 Blöcke) nach außen geneigt sind. Im Mittel zeigen die nach innen geneigten Blöcke einen Neigungsbetrag von $16.6^\circ \pm 14.2^\circ$, die nach außen geneigten Blöcke einen Neigungsbetrag von $5.4 \pm 3.9^\circ$. Die Maximalneigung nach innen beträgt 51° , nach außen 18.2° . Neben den Neigungen wurden die Rotationen aus der Normallage der Blöcke bestimmt. 58% der Blöcke (221 Blöcke) sind gegen den Uhrzeigersinn im Mittel um $6.6^\circ \pm 5.5^\circ$ gedreht während 42% der Blöcke (163 Blöcke) mit dem Uhrzeigersinn im Mittel um $6.4^\circ \pm 5.2^\circ$ gedreht sind. Die maximale Drehung gegen den Uhrzeigersinn liegt bei 40.6° , mit dem Uhrzeigersinn bei 24.1° .

Die Schadenszone in der Kloake korrespondiert in der Tiefenlage mit einem nahezu kohäsionslosen Sand, der während der Sedimentuntersuchungen (vgl. Kapitel 6.1.3) nachgewiesen werden konnte. In der finalen Ausgrabungsphase trat ein ähnlicher Sand in einer Tiefe von ca. 8.0 m durch Beschädigungen in den Wänden der Kloake und unter den Wänden der Kloake in den Innenraum ein. Ein Zusammenhang zwischen den Schäden und möglichen Hohlräumen durch Mobilisierung des dahinter liegenden Sandes liegt daher nahe.

Die Bewegung der Blöcke in der Schadenszone in Richtung des Innenraumes der Kloake deutet darauf hin, dass die Kloake zum Zeitpunkt der Schädigung nicht bis zu dem Niveau der Hauptschadenszone gefüllt war bzw. kann bei einer Befüllung über diese Niveau der Inhalt nur in geringem Maße verfestigt gewesen sein, da er keinen signifikanten Widerstand gegen das Eindringen der Blöcke bildete.

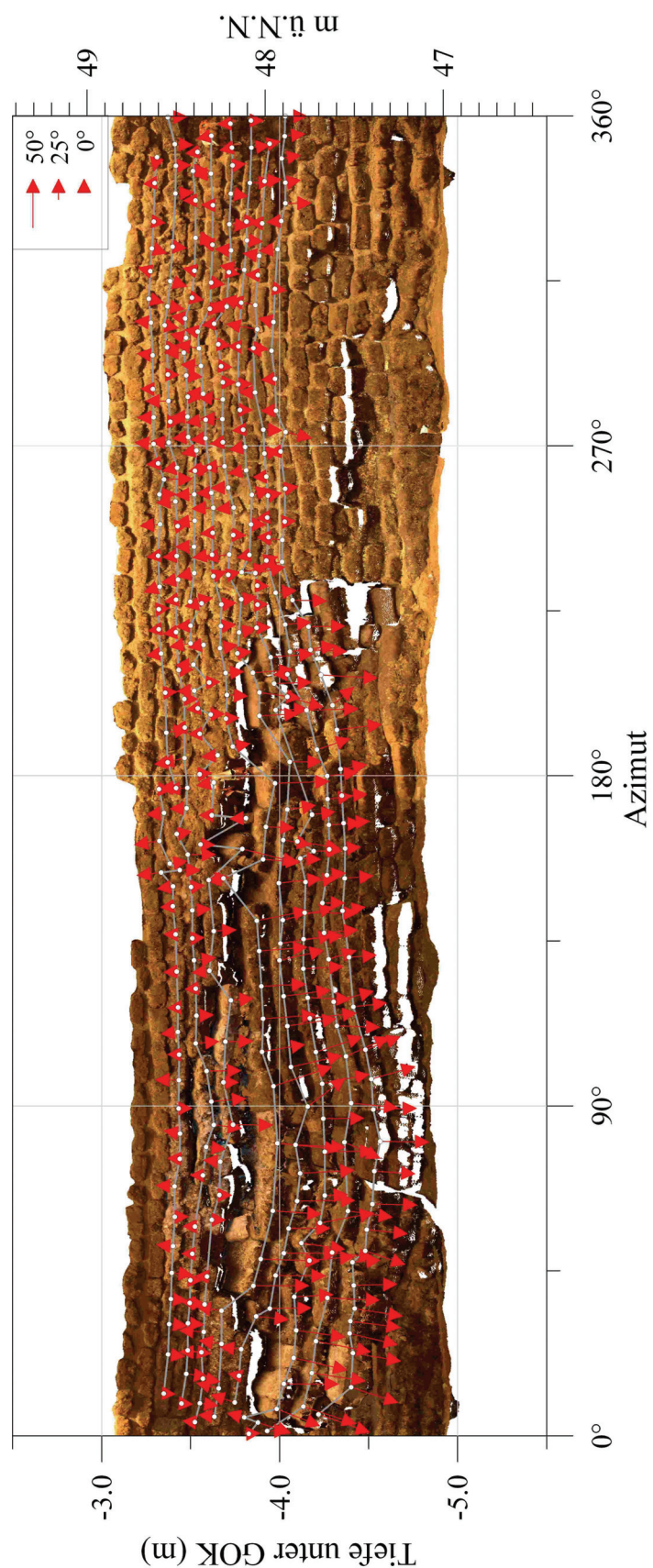


Abbildung 5.54: Darstellung der Lage der einzelnen Blöcke über der abgerollten Punktwolke der Schadenszone der Kloake. Die weißen Punkte zeigen die Mittelpunkte der berechneten Flächen zur Lagebestimmung der Blöcke. Die grauen Linien verbinden diese und zeigen so die Lage der gesamten Blocklage. Die Vektoren zeigen Stärke und Richtung der Neigungen und Rotationen der einzelnen Blöcke.

Die Befunde im Bereich unter der Frauensynagoge weisen neben einer Neigung nach Osten auch verschiedene Risse auf. Die Risse im Bereich des Fundamentes zeigen im südlichen Bereich Öffnungsweiten zwischen 2.5 cm und 5.0 cm. Im östlichen Bereich ist ein massiver Riss mit einem schubladenartigen horizontalen Versatz kombiniert. In diesem Bereich ist ein Teil der Struktur (1.2 m x 0.75 m) in Richtung Westen um bis zu 0.3 m aus dem Verband herausgesetzt (Abb. 5.55).

Neigungsmessungen für den östlichen Fundamentbereich haben Neigungen von bis zu 3.3° in Richtung Osten ergeben. Im Bereich des aufgehenden Mauerwerkes konnten Neigungen bis zu 22.3° in Richtung Osten nachgewiesen werden. Die festgestellten Neigungen können noch nicht abschließend bewertet werden, da die archäologische Auswertung und Interpretation noch nicht abgeschlossen ist und damit auch die ursprüngliche Struktur und der Verwendungszweck der Gebäudereste noch unklar sind. Im oberen Bereich des Mauerwerkes zeigen mehrere Blöcke sehr scharfkantige Risse, die teilweise im Entstehungsstadium konserviert wurden, d.h. der Riss durchzieht nicht den gesamten Block. Unklar ist hierbei ob die Risse zeitlich mit den restlichen Schäden im unteren Bereich in Verbindung stehen oder unabhängig davon entstanden sind. Die scharfkantigen Bruchkanten können auf eine Entstehung durch thermische Beanspruchung (z.B. Brand) hindeuten. Abbildung 5.55 zeigt einen Überblick über die festgestellten Schäden.

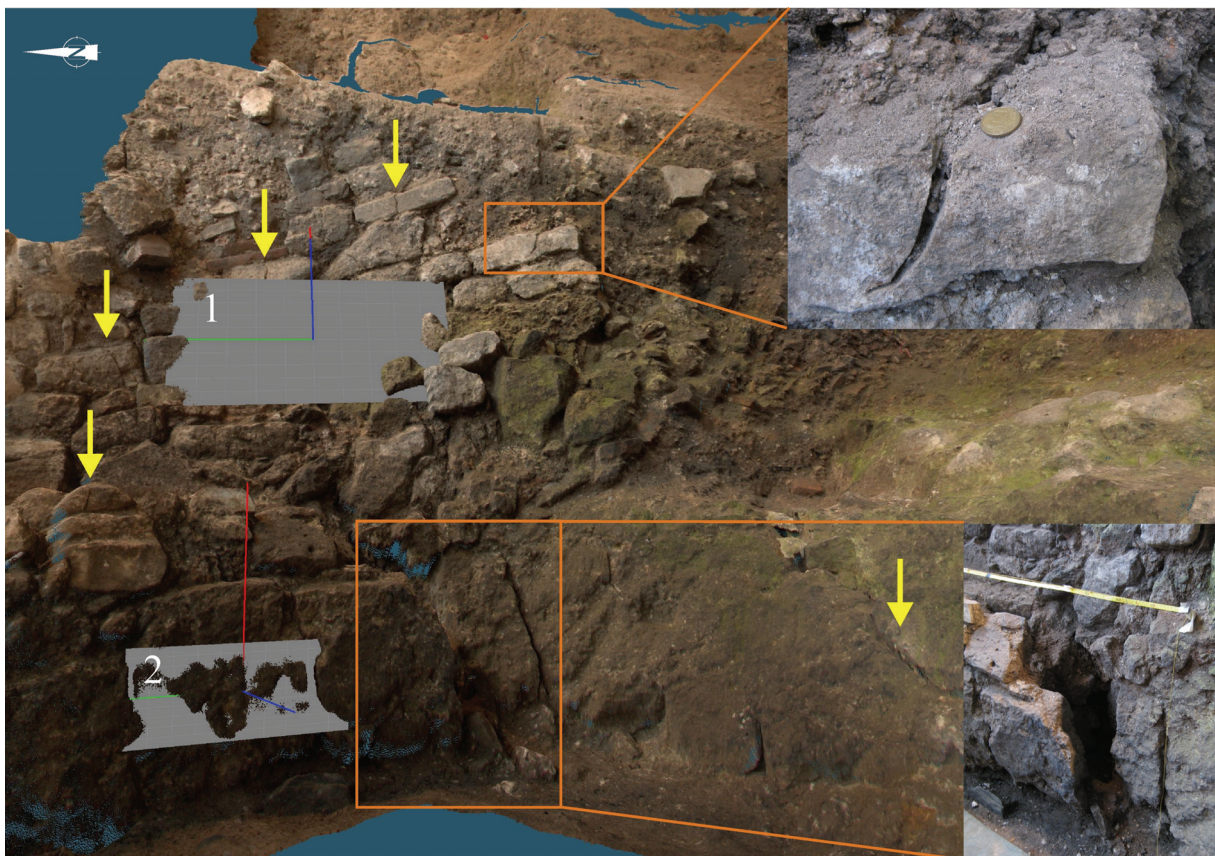


Abbildung 5.55: Übersicht der Schäden im Bereich unter der Frauensynagoge. Die Pfeile markieren Risse in der Struktur. Über an die Oberfläche angepasste Flächen wurden Neigung bis zu 22.3° im oberen Bereich (1) und 3.3° im unteren Bereich (2) festgestellt. Die orange Markierungen zeigen die Lage der Photos des Risses (oben) sowie des horizontalen Versatzes (unten).

5.3.4 Mikwe

EINLEITUNG

Die Kölner Mikwe wurde bei den Ausgrabungen von Doppelfeld in den 1950er Jahren wieder entdeckt, nachdem die unterirdischen Bereiche seit 1424 teilweise verfüllt und der Bau als Stall und Kloake genutzt wurde. Die Mikwe gliedert sich in mehrere Bereiche: Der Eingangsbereich, der ca. 12 m tiefe Mikweschacht sowie das Tauchbecken in einer Tiefe 36.66 m ü.NN (Abb. 5.56).

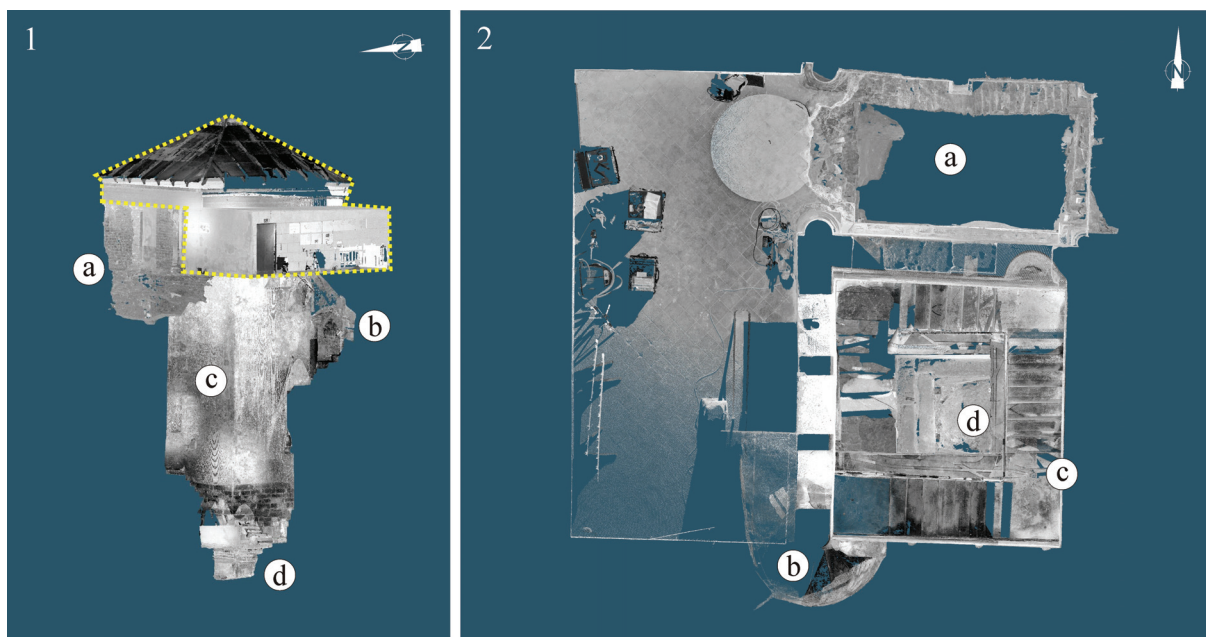


Abbildung 5.56: Perspektivische Ansicht der Mikwe (1) sowie eine Aufsicht mit den verschiedenen Bereichen der Mikwe (2). Die gelbe Linie markiert die moderne Konstruktion. (a) Eingangsbereich, (b) Treppenabgang zum Schacht, (c) Schacht, (d) Tauchbecken.

Die älteste Datierung aus dem Beckenbereich der Mikwe belegt eine Reparaturphase um 1000. Es liegt eine ältere, bislang undatierte Phase vor, die eine frühere Existenz der Anlage belegt. Schütte und Gechter (2011) vermuten die Ursprünge der Mikwe bzw. eines Vorgängerbaus (der nach Schütte und Gechter (2011) keine Grundwassermikwe beinhaltet) in einem Gebäude das sich direkt an den antiken Flügelbau auf dem Rathausplatz anschloss. Im Eingangsbereich der Mikwe ist eine Spolie aus römischer Zeit im Bereich des Schachtaufbaus zu finden.

BAUGESCHICHTE

Die älteste Bauphase im Bereich des Beckens befindet sich heute unter bzw. hinter einem Becken aus dem 13. Jahrhundert, das in die ältere Konstruktion hineingesetzt wurde. Diese älteste Bauphase lässt sich nur durch eine Reparaturphase um 1000 in die Zeit davor einordnen. Der Bebauungsplan der damaligen Zeit zeigt den direkten Anschluss an die Gebäude auf dem Rathausplatz. Nach Gechter und Schütte (2000) ist davon auszugehen, dass spätestens mit dem Umbau bzw. der Reparatur der Gebäude auf dem Rathausplatz um 800 die Mikwe ebenfalls umgebaut und erweitert wurde.

In der westlichen Beckenseite liegt eine Holzkonstruktion aus dem 13. Jahrhundert, die später (>1349) von großen Sandsteinstufen verdeckt wurde (Schütte und Gechter, 2011).

Der Mikweschacht mit seinem Treppenabgang zeigt ebenfalls mehrere Umbauphasen. Zunächst erfolgte der Zugang zum Schacht über rechtwinklig um den Schacht verlaufende Treppen. Diese Konstruktion wurde jedoch durch eine Wendeltreppe ersetzt, über die auch der Zugang zu einer Umkleidenische erfolgt. Der ursprüngliche Zugang wurde vermauert (Schütte und Gechter, 2011). Befunde im Eingangsbereich der Mikwe zeigen, dass der Zugang zur Mikwe zumindest in der letzten Nutzungsphase von Osten erfolgte. In dieser Phase (12. Jahrhundert) wurde vermutlich auch der Aufbau auf dem Schacht erneuert und in die heute erhaltene Form gebracht.

Bei der Ergrabung des Untergrundes des Eingangsbereiches konnten neben verschiedenen Fußbodenniveaus auch Reste einer älteren Bauphase nachgewiesen werden, die massive Schäden zeigt.

BAUBESCHREIBUNG

Die heute erhaltene Bauphase der Mikwe ist im Eingangsbereich durch den aus Tuffblöcken gemauerten Aufbau des Mikweschachtes geprägt. Im Bodenbereich dieser Aufmauerung finden sich in der Nordwest-Ecke Reste der antiken Bebauung. In den tuffdominierten Mauern finden sich teilweise große Blöcke aus rotem Sandstein sowie Trachytverstärkungen. In der Westwand der Aufmauerung ist auf dem Niveau des Eingangsbereiches ein Doppelfenster eingearbeitet, das den Blick auf den Schacht freigibt.

Die Wände im Eingangsbereich der Mikwe sind vorwiegend aus ehemals verputzten Tuffblöcken aufgebaut, zeigen jedoch in der östlichen und nördlichen Wand Reparaturen bzw. Vermauerungen mit Ziegeln. Der nördlichen Wand sind drei Halbsäulen vorgesetzt. Die Ecken der Schachtaufmauerung sind im Nordosten und Nordwesten ebenfalls mit Halbsäulen versehen.

Im Untergrund des Eingangsbereiches befinden sich die Reste einer älteren Struktur aus Tuff und Basaltsäulen. Dieser Befund liegt im Untergrund der Ostwand sowie in der Verlängerung der westlichen Schachtwand nach Norden. Es handelt sich um zwei Mauern, die unter einer Aufmauerung aus Tuffblöcken einen bzw. zwei Bögen über mehrlagig angeordneten, massiven Basaltsäulen zeigen. Dieser Befund wird im Abschnitt „Schäden“ dargestellt.

Mittig vor der Westwand des Schachtes beginnt der Treppenabgang, der über eine Umkleidenische um den Schacht herumführt und in einer Höhe von 44 m ü.NN durch die Südwand des Schachtes zur Treppe innerhalb des Schachtes führt. Der innere Treppenabgang folgt der Südwand nach Osten und führt gegen den Uhrzeigersinn entlang der Wände zum Becken auf einer Höhe von 37.79 m ü.NN (Oberkante).

Das Becken selbst zeigt den Zustand nach dem 13. Jahrhundert und ist durch Tuffblöcke, Sandsteinplatten bzw. Stufen geprägt. Das ca. 1.06 x 1.24 m große Becken hat eine Tiefe von 0.88 m (unterhalb der letzten Stufe) und kann daher eine Wassermenge von min. 1155 l aufnehmen, was die religiösen Voraussetzungen von einem Minimum von 40 Seah (~575 l) deutlich erfüllt.

KARTIERUNG

Der Bereich der Mikwe wurde in mehreren Scankampagnen kartiert. In einer ersten Kampagne im September 2009 wurde während einer Phase mit niedrigem Grundwasserstand der Beckenbereich mit vier Scans erfasst. Zu diesem Zeitpunkt konnte das Becken ohne die innen liegenden Trittstufen dokumentiert werden, die im Zuge von archäologischen Grabungen entfernt wurden. Bei der Aufnahme der Scans wurde die schon bei der Kartierung des Brunnen eingesetzte Aluminiumplatte verwendet und mit justierbaren Metallfüßen ausgestattet. Dadurch konnte der Scanner im Becken platziert werden und so die Abschattung durch das Scannergehäuse minimiert werden. Abbildung 5.57 zeigt die Konfiguration des Scanners bei der Aufnahme und die kombinierte Punktwolke des Beckenbereiches der Mikwe.

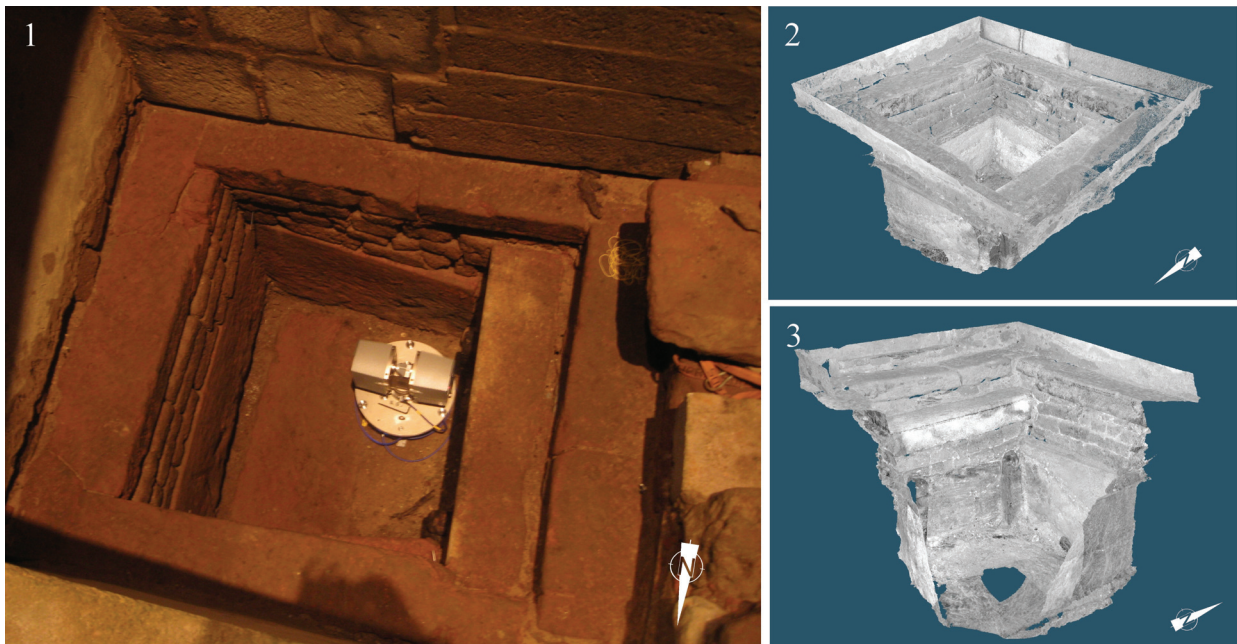


Abbildung 5.57: Scannerkonfiguration bei der Kartierung des Bereichs (1) und kombinierte Punktwolke des Tauchbeckens der Mikwe (2). (3) Kombinierte Punktwolke des Tauchbeckens. Zur besseren Ansicht wurde die Südostecke des Beckens ausgeblendet.

Anfang 2010 wurde der Boden im Eingangsbereich der Mikwe entfernt und die Fundamente archäologisch ergraben. Im April 2010 konnte die Grube im Eingangsbereich mit drei Scans sowie der Schacht mit vier Scans erfasst werden. Aufgrund der komplexen Befundlage in der Grube im Eingangsbereich wurde diese weiter vertieft, so dass im Juli 2011 ein weiterer Scan in diesem Bereich durchgeführt wurde. Hierbei kam erneut die Aluminiumplatte zum Einsatz, um steile Aufnahmewinkel in den unteren Fundamentbereichen zu vermeiden. Abbildung 5.58 zeigt eine Übersicht über die Scannerstandorte im Bereich der Mikwe.

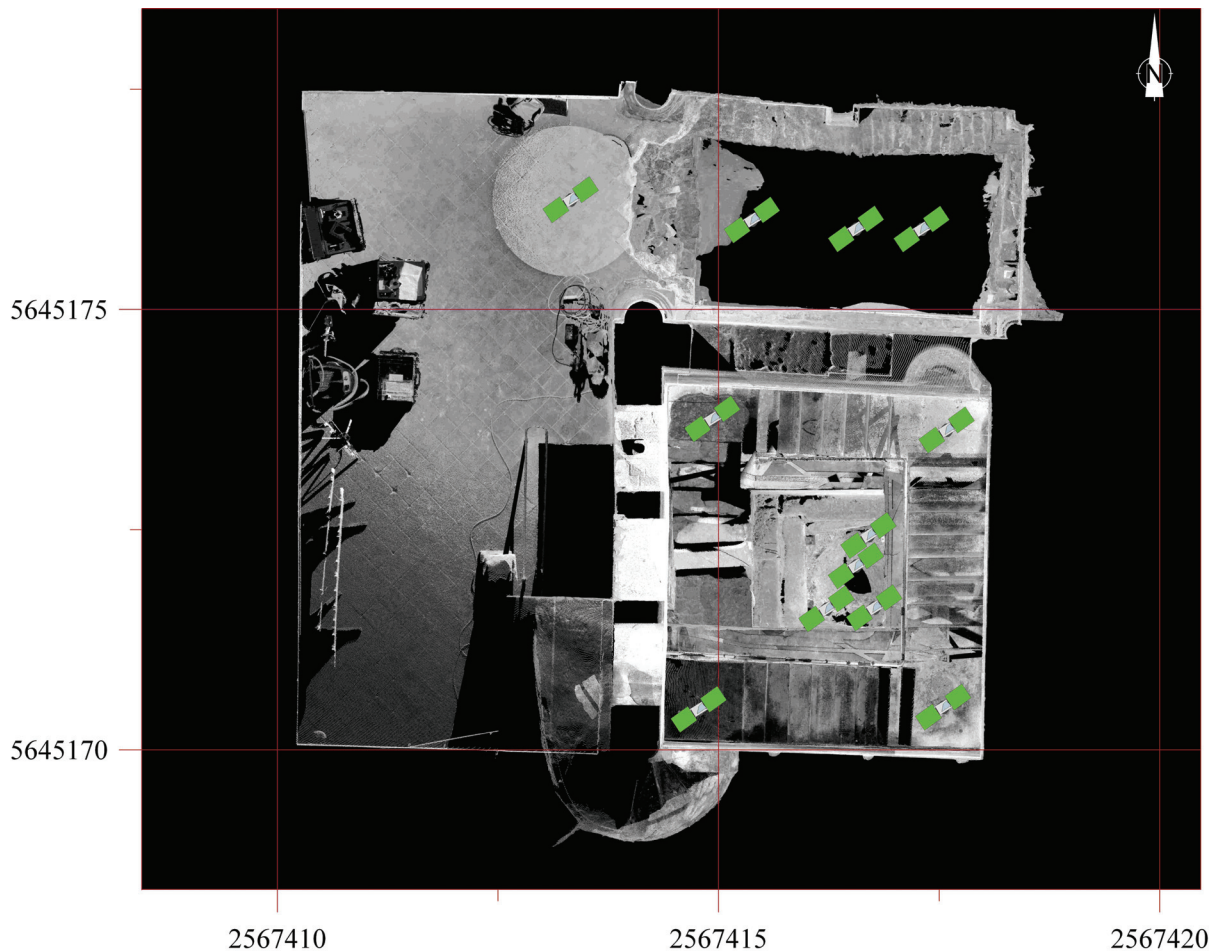


Abbildung 5.58: Scannerstandorte bei der Kartierung der Mikwe.

SCHÄDEN

Im Beckenbereich lassen sich Schäden durch Reparatur- und Umbauphasen nur indirekt nachweisen. Die eigentlichen Schäden können nicht mehr nachgewiesen werden.

Am Mikweschacht wurden mit Hilfe von 16 Profilschnitten 62 Neigungsmessungen durchgeführt. Während vereinzelte Neigungswerte in Richtung Norden, Osten und Westen bestimmt wurden, die durch kleinräumige Anomalien in der Gebäudestruktur zu erklären sind, zeigt sich in der Gesamtstruktur eine leichte Neigung in Richtung Süden. Im Mittel liegt diese bei $1.5^\circ \pm 1.4^\circ$. Die Neigung entspricht bei einer Strecke von 10 m im Schacht einem horizontalen Versatz der Seitenwand um 0.26 m. Dass eine derartige Abweichung in nur eine Richtung während der Konstruktion des Schachtes erzeugt wurde ist unwahrscheinlich. Die Neigung eines so großen Komplexes ohne weitere Schäden, scheint ebenfalls unwahrscheinlich. Die Tatsache, dass die Wände des Schachtes von diversen Bau- und Umbauphasen überprägt wurde, lässt vermuten, dass eventuelle Risse, die bei einer Schrägstellung des Schachtes zu erwarten sind, nicht mehr erkennbar sind.

Im Eingangsbereich konnten die umfangreichsten Beschädigungen im Mikwebereich in den Fundamenten der Eingangshalle nachgewiesen werden. In einer ca. 3.5 x 2.0 m großen Grube wurden an der westlichen und der östlichen Stirnseite jeweils die Fundamente einer Nord-Süd verlaufenden Struktur gefunden (Abb. 5.59).

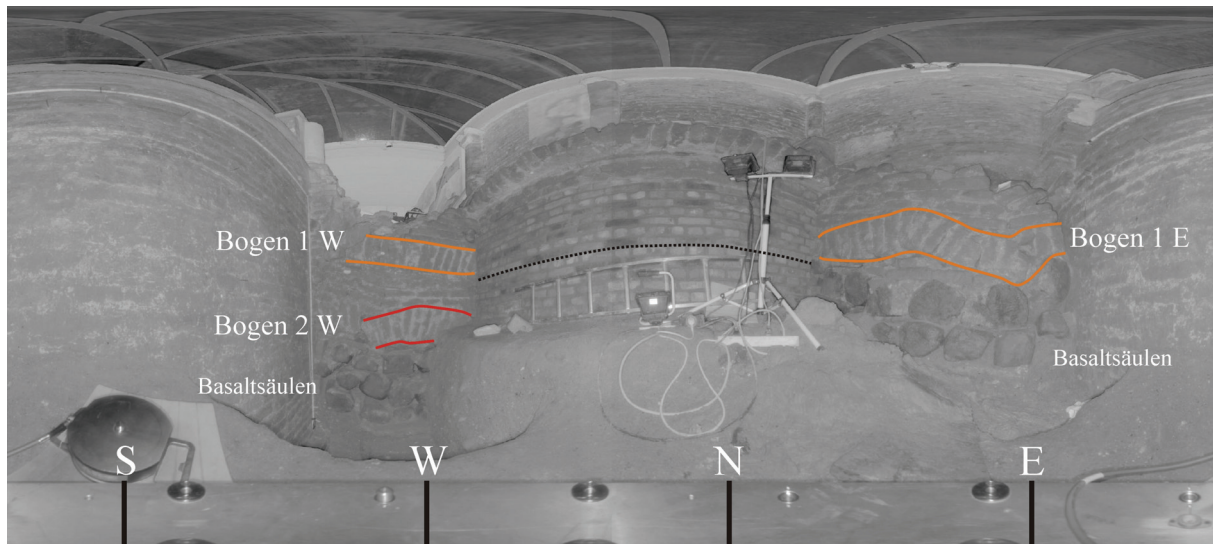


Abbildung 5.59: Panoramaansicht eines Scans der Grube im Eingangsbereich der Mikwe. Die Linien markieren die Bögen der Strukturen. Die gestrichelte schwarze Linie verläuft zur Orientierung auf einem Höhenniveau.

Im oberen Bereich ist die Struktur aus mittelgroßen Tuffquadern aufgebaut. Unter dem Tuffmauerwerk folgt sowohl im Westen, als auch im Osten eine bogenartige Struktur aus vermörtelten Tuffquadern. An der nördlichen Schachtwand sind ca. 40 cm über dem heutigen Niveau der Bogenstrukturen verzahnte Ansatzstellen zu sehen. Im Osten folgt unter dem Bogen ein aus großen Basaltsäulen aufgebautes Fundament (Abb. 5.60).

Im Westen setzt sich das Mauerwerk noch ca. 50 cm in die Tiefe fort, bevor ein zweiter Bogen den gemauerten Teil abschließt. Darunter folgt ein dem Osten vergleichbares Fundament aus Basaltsäulen (Abb. 5.61).

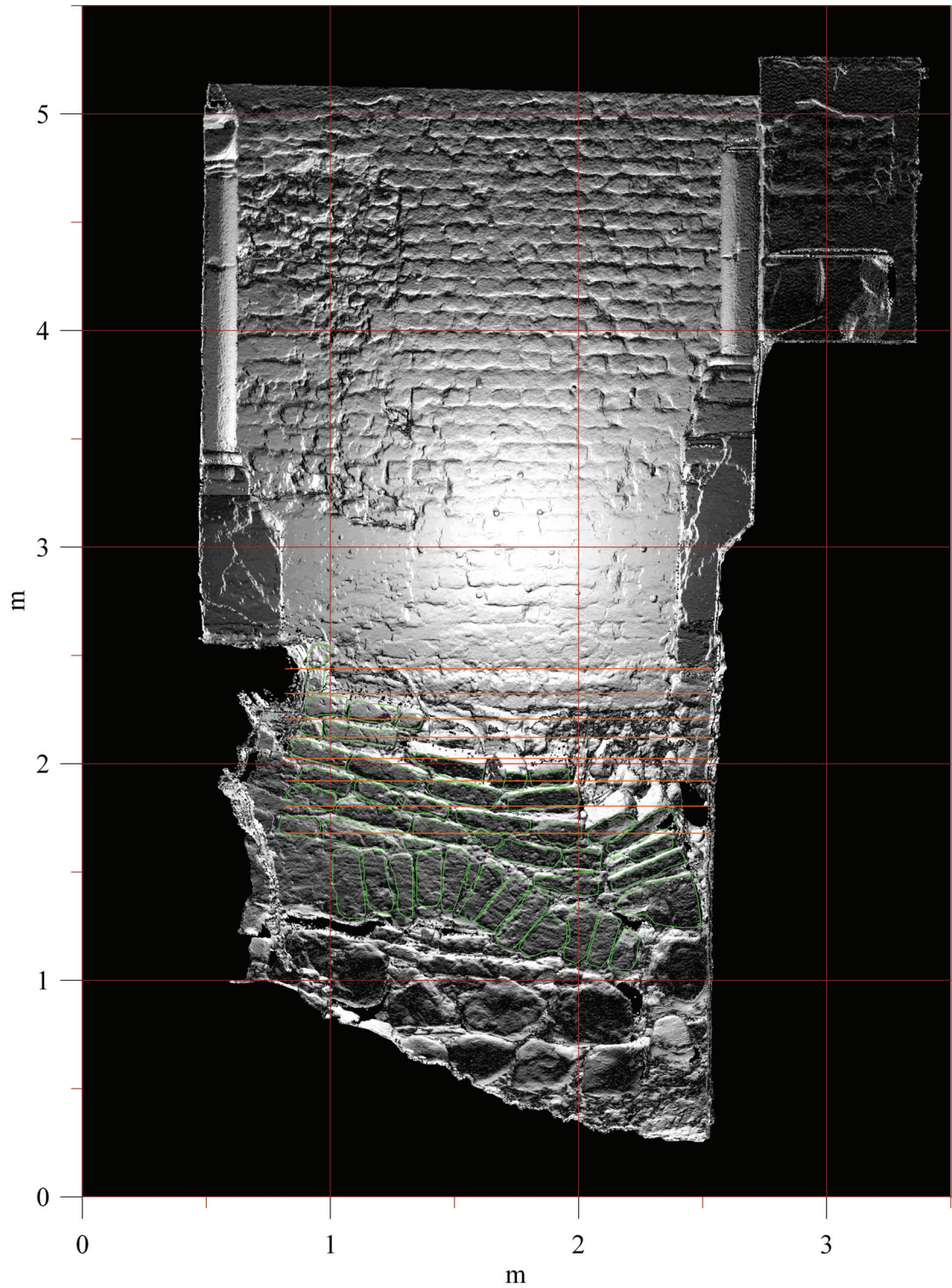


Abbildung 5.60: Orthophoto der Ostwand (Ansicht von Westen) in der Grube im Eingangsbereich der Mikwe mit den in der Rekonstruktion verwendeten Blöcken (grün). Orange Linien zeigen die ursprüngliche Lage der Blockreihen.

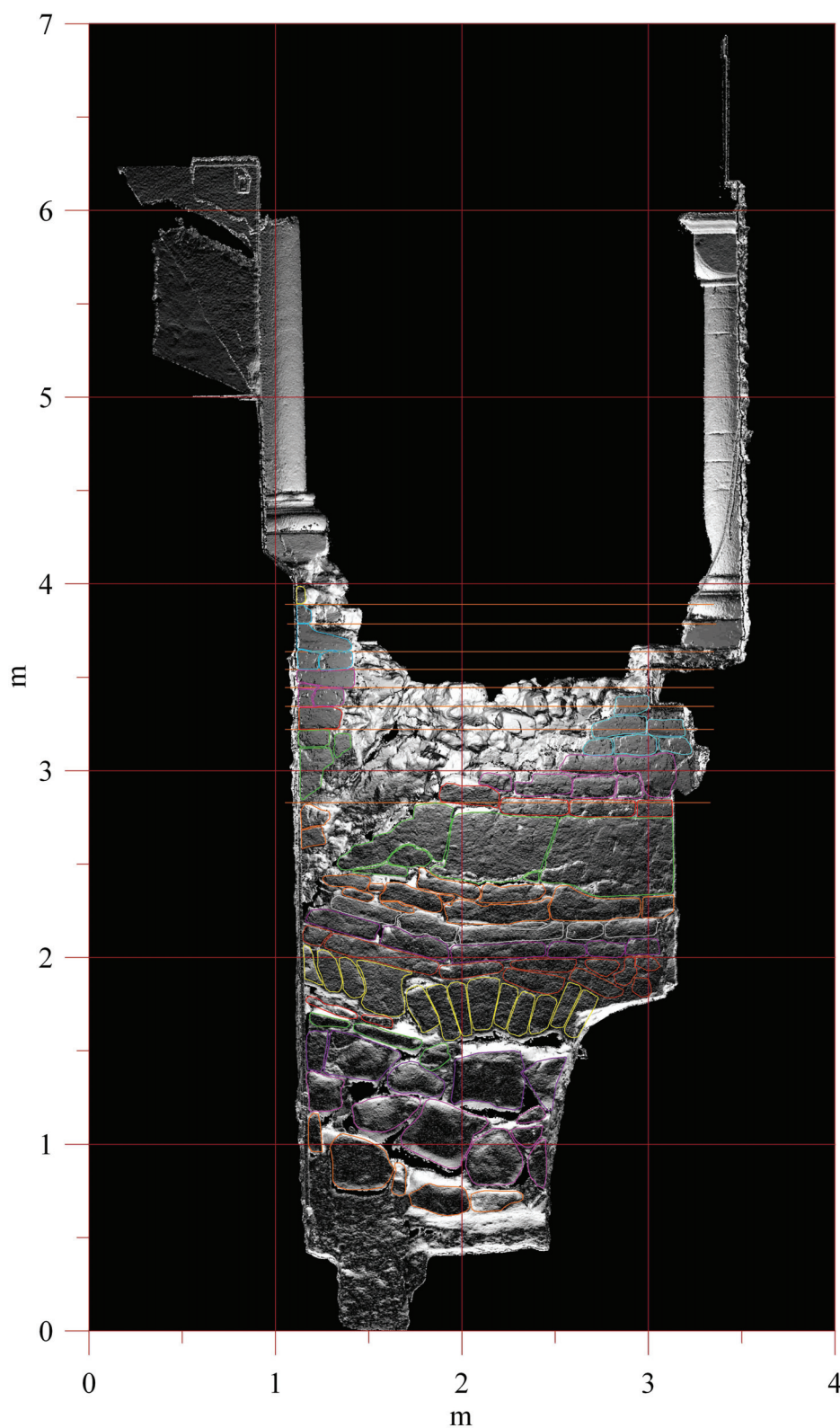


Abbildung 5.61: Orthophoto der Westwand (Ansicht von Osten) in der Grube im Eingangsbereich der Mikwe mit den in der Rekonstruktion verwendeten Blöcken. Die verschiedenen Farben zeigen Blöcke einer Blocklage. Orange Linien zeigen die ursprüngliche Lage der Blockreihen.

Beide Seiten zeigen Schäden, die auf einen vertikalen Versatz und den damit verbundenen Zusammenbruch der Bogen-Wand-Konstruktion hindeuten. Im westlichen Bereich sind die Basaltsäulen des Fundamentes ebenfalls mit versetzt worden. Dies lässt sich am östlichen

Befund nicht zeigen. Auf Grundlage von Orthophotos der beiden Wände wurden die Schäden quantifiziert und die ursprüngliche Form der Wand-Bogen-Konstruktion rekonstruiert (Abb. 5.62 und Abb. 5.63).

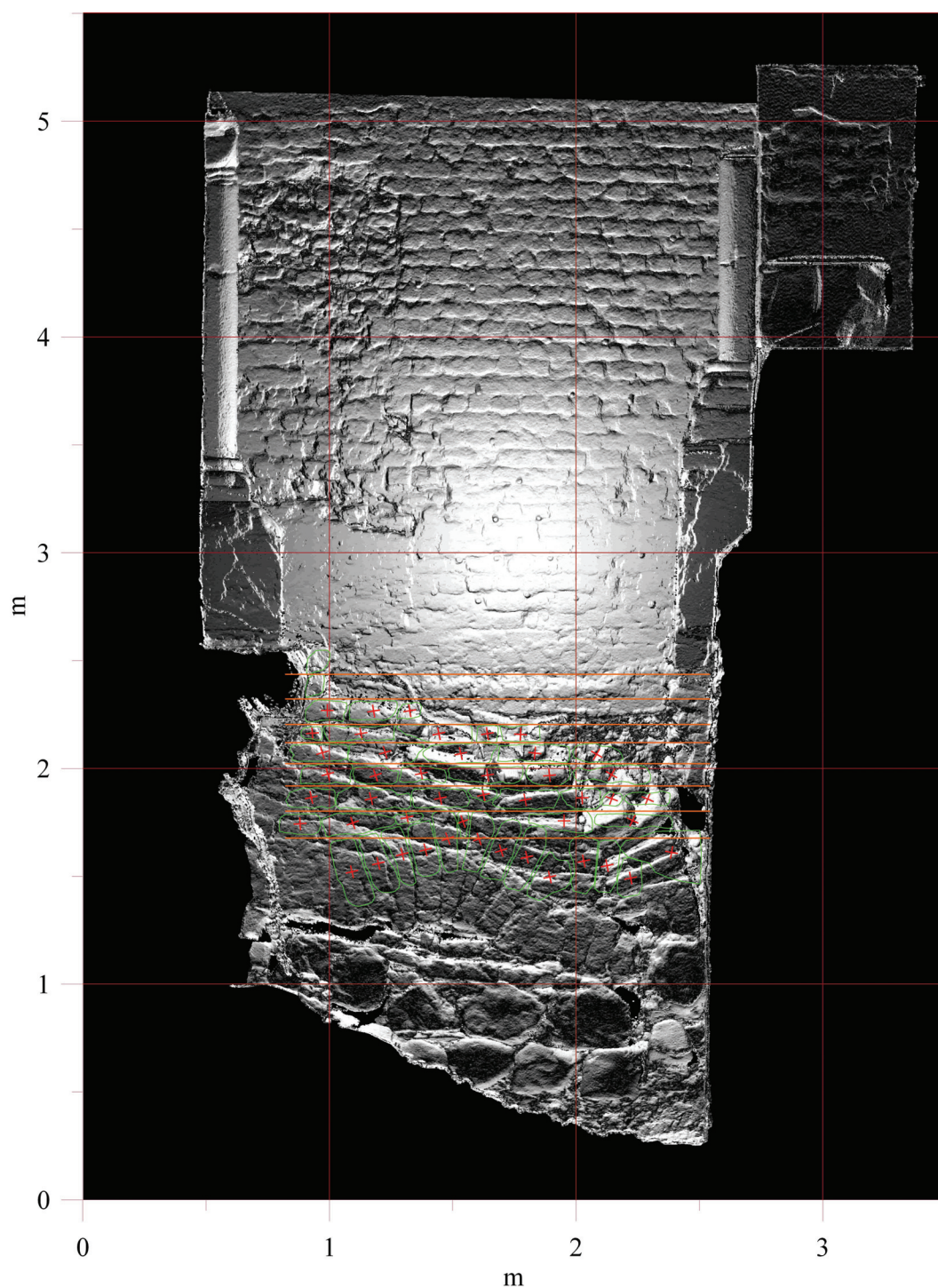


Abbildung 5.62: Rekonstruktion der Ostwand auf Grundlage des Bogenansatzes in der Nordwand des Mikweschachtes. Die roten Kreuze verdeutlichen die Rotation der einzelnen Blöcke bei der Rekonstruktion. Orange Linien zeigen die ursprüngliche Lage der Blockreihen.

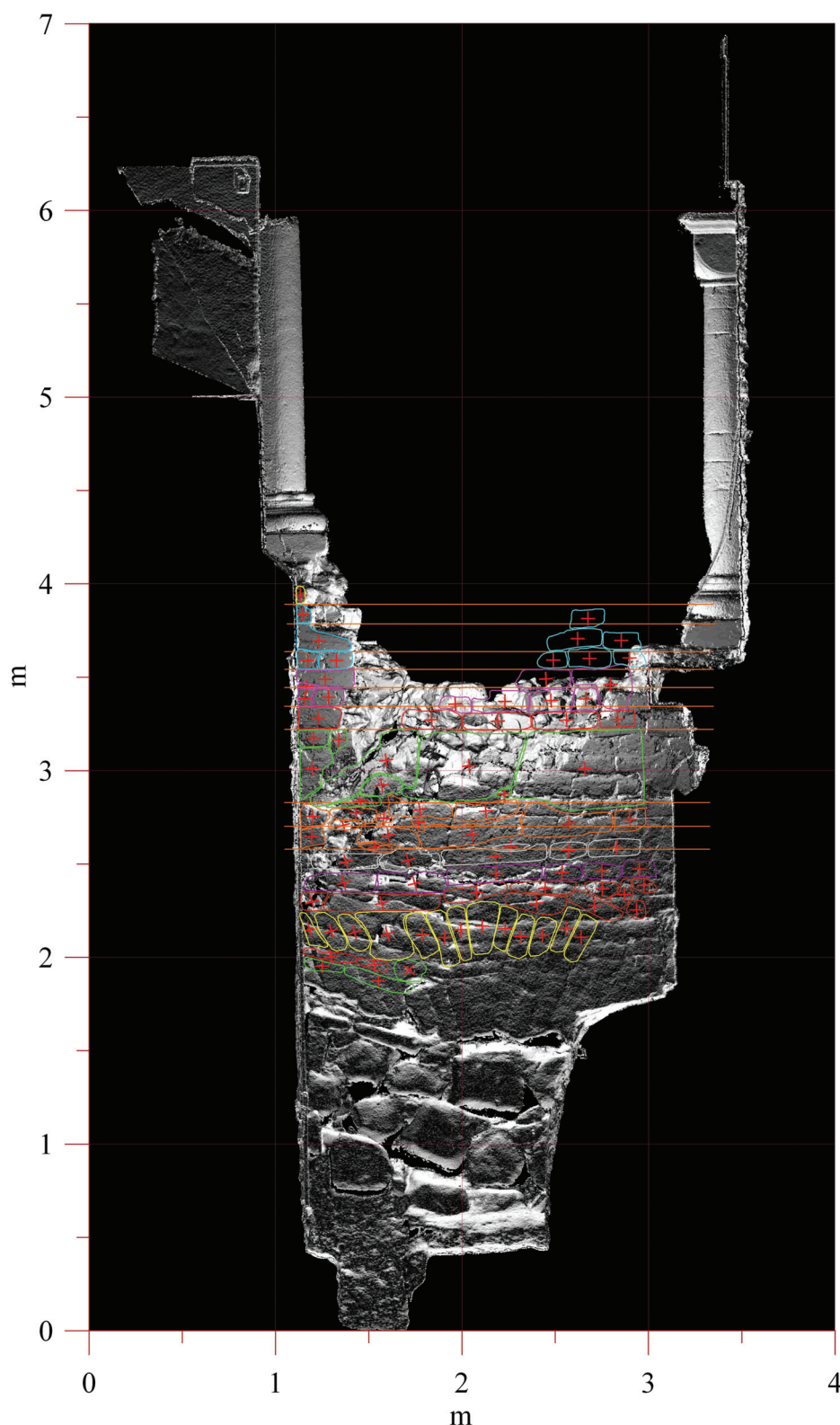


Abbildung 5.63: Rekonstruktion der Westwand auf Grundlage des Bogenansatzes in der Nordwand des Mikweschachtes. Die verschiedenen Farben zeigen Blöcke einer Blocklage. Die roten Kreuze verdeutlichen die Rotation der einzelnen Blöcke bei der Rekonstruktion. Orange Linien zeigen die ursprüngliche Lage der Blockreihen.

Es zeigt sich, dass die Struktur im Westen wesentlich tiefer herabreicht als im Osten. Der östlichen Bogen korreliert in seiner Tiefenlage mit dem oberen der beiden Bögen im Westen.

Auch nach der Rekonstruktion, die für beide Seiten einen vertikalen Versatz von ca. 0.4 m ergab liegen diese Bögen auf einem Niveau. Warum der westliche Befund insgesamt eine größere Tiefe gegenüber dem östlichen erreicht, ist unklar. Bislang gibt es weder eine archäologische Deutung der Konstruktion, noch eine Datierung. Neben dem ungeklärten Nutzen der Konstruktion wurde bei der archäologischen Ergrabung eine weitere Besonderheit gefunden. Der gesamte Bereich besitzt in dieser Tiefenlage keine Nordwand. Während zumindest die Bogenstrukturen ehemals mit dem Mikweschacht im Süden verzahnt waren laufen die Konstruktionen im Norden in direkt anstehenden Sand. Die Sedimentstrukturen des Sandes wurden während der archäologischen Auswertung als Hinweis auf eine natürliche Ablagerung gedeutet. Mittlerweile ist dieser Befund nicht mehr zugänglich, da aus statischen Gründen die Grube nach Norden mit einer Mauer abgesichert werden musste. Für die Deutung der Schäden gibt es mehrere Möglichkeiten. Zum einen kann die Neigung des Schachtes nach Süden im Zusammenspiel mit der fehlenden Verankerung der Bogenanlage im Norden zu einem Zusammensturz geführt haben, zum anderen reichen wahrscheinlich geringe Bewegungen im, wie in den Sedimentuntersuchungen nachgewiesen wurde, sehr instabilen Baugrund aus, um zu einem Kollaps der Anlage zu führen. Eine weitere Möglichkeit ist, dass es sich um Reste einer älteren Bauphase handelt, deren nördliches Pendant bei der Reparatur bzw. der Neubebauung verloren ging. Dies würde allerdings voraussetzen, dass die Sande im Norden nicht natürlich in diesem Bereich anstehen. Einzig unstrittig ist, dass ein vertikaler Versatz von ca. 40 cm sowohl in der Ostwand, als auch in der Westwand vorliegt und die komplette Konstruktion um diesen Betrag abgerutscht ist. Um dies zu ermöglichen muss, auf die Maße der Grube bezogen ein Hohlraum von mindestens 2.8 m³ vorgelegen haben. Ob dieser Hohlraum durch Mobilisierung des darunter liegenden Materials entstanden ist, oder ob die Bogenanlagen einen solchen Hohlraum überspannt haben ist unklar. Die massiven Basaltsäulen im Untergrund der Westwand deuten jedoch darauf hin, dass diese mit abgerutscht sind und nahezu nahtlos an die Bogenkonstruktion ansetzten, so dass ein überspannter Hohlraum nicht wahrscheinlich ist. Ebenso sprechen Mörtelreste im Bereich der Basaltsäulen dafür, dass diese nicht nachträglich zur Stabilisierung eingebracht wurden, sondern direkt ein Teil der Konstruktion waren.

5.3.5 Weitere Befunde

Neben den in dieser Arbeit vorgestellten Befunden gibt es im Bereich des Grabungsfeldes Süd weitere Schäden und Deformationen. Diese Schadensbefunde konnten bislang nicht genauer untersucht werden, da die Grabungsarbeiten in diesem Areal noch nicht abgeschlossen sind. Dadurch ist der Bereich temporär nicht für eine Vermessung mit dem Laserscanner zugänglich. Im Folgenden werden diese Befunde dargestellt (Abb. 5.64). Eine 3D-Kartierung sowie die quantitative Auswertung kann vermutlich erst nach Abschluss der Grabungsaktivitäten erfolgen.

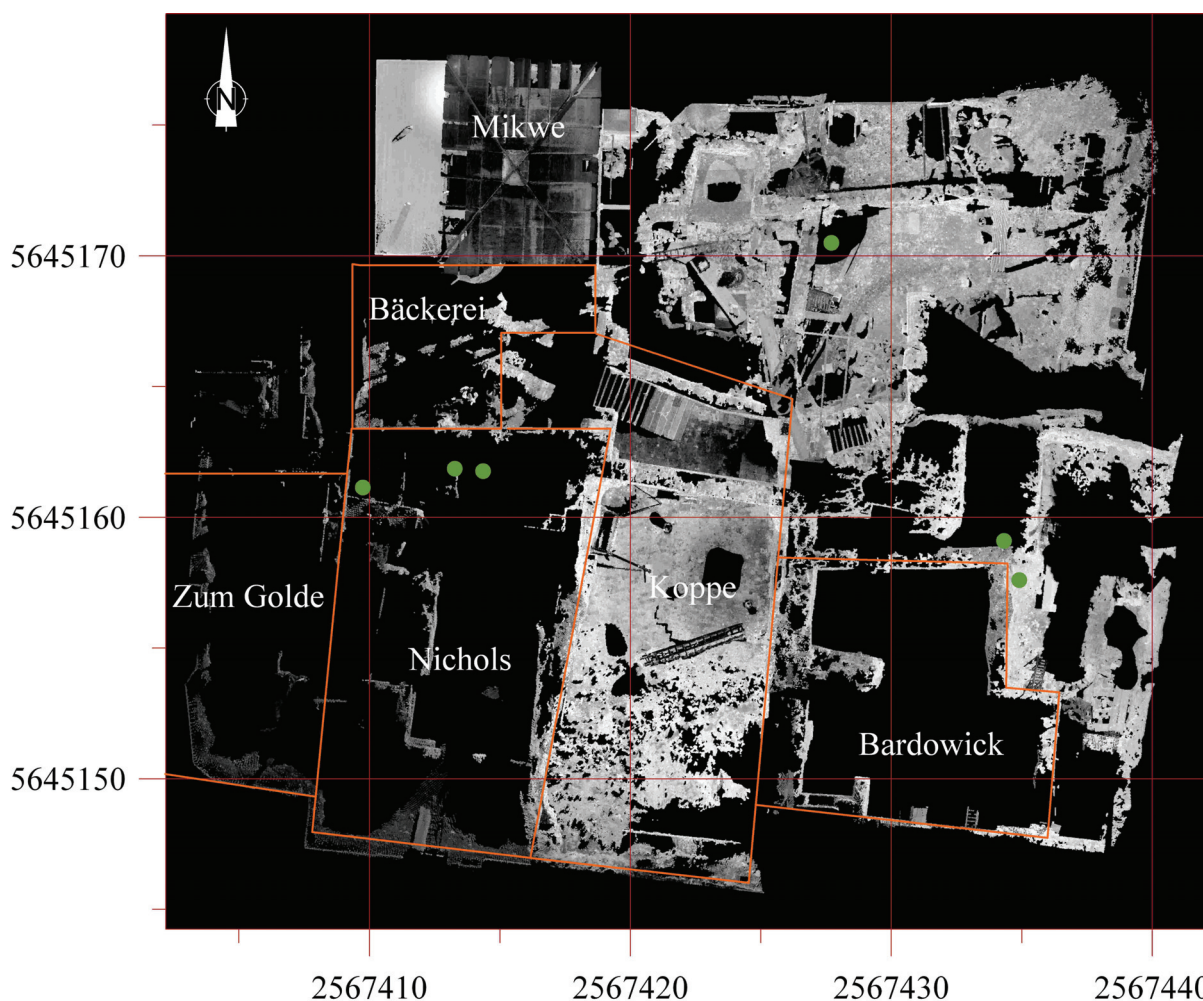


Abbildung 5.64: Übersicht über die Befunde auf dem Grabungsfeld Süd (grüne Punkte). In orange sind die Umrisse der mittelalterlichen Gebäude eingezeichnet.

BÄCKEREI/HAUS NICHOLS

Im Bereich der Bäckerei bzw. des Haus Nichols, beide Bestandteile des mittelalterlichen jüdischen Viertels, wurden bislang drei Schäden identifiziert (Abb. 5.64). An einer Nord-Süd verlaufenden Wand aus kleinen bis mittelgroßen Tuffquadern zeigen sich deutliche Deformationen (Abb. 5.65).



Abbildung 5.65: Deformierte Wand südlich der Mikwe. Die Rechtecke markieren die Detailaufnahmen a und b. (a) Brunnen mit deutlichen Reparaturspuren, (b) Deformation im nördlichen Bereich der Wand. Im Norden schließt hier eine tiefer liegende Struktur an, die den Untergrund stabilisiert.

Diese Deformationen deuten auf eine ungenügende Fundamentierung der Wand, die Bewegungen im Untergrund nicht standhalten konnte. Dadurch ist die Wand im zentralen bis südlichen Bereich, vertikal abgesackt. Direkt vor der Wand liegt ein mittelalterlicher Brunnen, der tief greifende Reparaturen zeigt. Zudem ist eine Verkürzung des Ost-West Durchmessers zu erkennen. Im Westen der Nord-Süd verlaufenden Mauern liegt eine stark deformierte und zerbrochene Treppe die in das 15. Jahrhundert eingeordnet wird (Abb. 5.66). Die Photos in Abbildung 5.66 zeigen die Treppe nach der Restauration. Es ist zu erkennen, dass die Stufen mit denen im Westen und Osten liegenden Wänden des Treppenaufgangs verzahnt waren. In diesem Bereich muss sich die gesamte Struktur im Osten der Treppe gesenkt und die Stufen zumindest im Westen aus der Wand herausgebrochen haben. Direkt vor der Treppe, im Norden, liegt ein rechteckiges Becken, an dessen südlicher Wand ein horizontaler Versatz zur angrenzenden westlichen Wand zu sehen ist.



Abbildung 5.66: Deformierte Treppe im Südwesten der Mikwe. Das Rechteck markiert die Lage der Detailaufnahme (a), der Pfeil die Position des Beckens vor der Treppe, das in Detailaufnahme (b) zu sehen ist (Photos: Hinzen, 2011).

BRUNNEN ÖSTLICH DER MIKWE

Im zentralen Bereich des nördlichen Grabungsfeldes Süd liegt ein deformierter, mittelalterlicher Brunnen (Abb. 5.67).



Abbildung 5.67: Deformierter mittelalterlicher Brunnen östlich der Mikwe.

Der Brunnen zeigt eine deutliche Verkürzung des West-Ost-Durchmessers. Diese Verkürzung deutet auf eine Erhöhung des Ost-West gerichteten seitlichen Druckes im Untergrund. Im unteren Bereich sind Anzeichen für eine Reparatur zu finden. Die Reparaturstellen zeigen jedoch Versätze und Rotationen, so dass entweder die Reparatur mangelhaft ausgeführt wurde oder aber der Brunnen nach der Reparatur erneut beschädigt wurde.

NORD-OST ECKE HAUS BARDOWICK

In der nördlichen und östlichen Mauer des mittelalterlichen Haus Bardowick finden sich in der Nordostecke deutliche Risse und Versätze (Abb. 5.68).



Abbildung 5.68: Beschädigungen an der Nordostecke des Haus Bardowick (Photos: Hinzen, 2009).

Während der Riss in der östlichen Wand vom Anschluss an die Nordwand ausgeht und teilweise den Fugenverläufen folgt, durchzieht der Riss in der nördlichen Wand mehrere Ziegel.

Bei allen hier vorgestellten Befunden ist die archäologische Auswertung noch nicht abgeschlossen. Es ist also noch unklar wann die Schäden entstanden sind bzw. ob oder wie die beschädigten Strukturen weiterverwendet wurden. Aus diesem Grund werden diese Befunde nur bedingt in die Interpretation des Gesamtschadensbildes mit einbezogen.

6. Ingenieurseismologische und geotechnische Modellierung

Neben der Kartierung und Auswertung der archäologischen Befunde umfasst das in Kapitel 2.0 vorgestellte Arbeitsschema die Untersuchung der Topographie des Arbeitsgebietes, der Zusammensetzung des Untergrundes sowie der regionalen, geologischen und seismotektonischen Situation. Die Untersuchung der Oberfläche und des Untergrundes des Arbeitsgebietes sind die Grundlage eines geotechnischen Modells. Die Untersuchung der tektonischen und seismologischen Situation resultiert in einem seismotektonischen Modell. Das seismotektonische Modell bildet die Grundlage für die Berechnung von standort-spezifischen, synthetischen Seismogrammen. Das geotechnische Modell und die Ergebnisse aus dem seismotektonischen Modell ermöglichen die Simulation von Schadensszenarien.

6.1 Geotechnisches Modell

Das geotechnische Modell kombiniert die Ergebnisse der Topographieuntersuchung mit den Erkenntnissen, die über den Untergrund des Arbeitsgebietes gewonnen werden konnten. Das kombinierte Modell des Arbeitsgebietes wurde als Finite-Element-Modell mit der Software Geostudio 2007 (Geoslope, 2007) erstellt.

6.1.1 Oberflächenmodell

2010 wurde an der Erdbebenstation Bensberg eine Diplomarbeit (Wiosna, 2010) zur Morphologie des Areals in der Kölner Altstadt, der Zusammensetzung des Untergrundes und des Verhaltens unter seismischer Belastung angefertigt. Erster Schritt war hierbei die Aufarbeitung und Verfeinerung eines Oberflächenmodells für den Bereich der Kölner Innenstadt. Hierzu wurde ein bestehender Datensatz (Holthausen, 1994) der schon von Hinzen und Schütte (2003) aktualisiert wurde, durch neuere Erkenntnisse, die sich u.a. durch die Planung zu einer neuen U-Bahn Strecke ergeben haben, ergänzt. Der Basisdatensatz in der aktualisierten Fassung von Hinzen und Schütte (2003) umfasst Höhendaten des gewachsenen Bodens aus historischen Karten (Schulze und Steuernagel, 1895; Köhler, 1941), archäologischen Fundberichten des Römisch-Germanischen Museums, Schichten-verzeichnissen des Geologischen Dienstes NRW, Bohrungen des Amtes für Brücken- und U-Bahn Bau Köln sowie Daten aus eigener Feldarbeit. Dieser Datensatz wurde von Wiosna (2010) durch Daten aus einer Baugrunduntersuchung, die im Zuge von Umbaumaßnahmen im Innenhof des Spanischen Baus des Rathauses durchgeführt wurden (Institut für Geotechnik Offer, 2000), Baugrunduntersuchungen der Kölner Verkehrsbetriebe (KVB), die im Zuge der Erkundung für die Trasse der Nord-Süd-Stadtbahn durchgeführt wurden (Erdbaulaboratorium Essen, 1998; 2002; 2005), einer Rammkern-Sondierungskampagne die vor Beginn der archäologischen Grabungen auf dem Rathausplatz durchgeführt wurde (GFM Umwelttechnik, 2007) sowie Daten aus Rammkernsondierungen, die im Jahr 2009 im Rahmen des Projektes im Praetorium durchgeführt wurden, ergänzt. Eine weitere Baugrunduntersuchung wurde im Bereich des Rathauses durchgeführt (Dr. Tillmans und Partner, 2009), die ebenfalls in den Datensatz integriert werden konnte. Die angegebenen Quellen resultierten in einem Datensatz von 350 Höhenangaben für ein knapp 1 km² großes Gebiet in der Kölner Altstadt (Wiosna, 2010). Daraus wurde auf Grundlage einer Gitternetzberechnung ein dreidimensionales Oberflächenmodell des Arbeitsgebietes erstellt (Abb. 6.1).

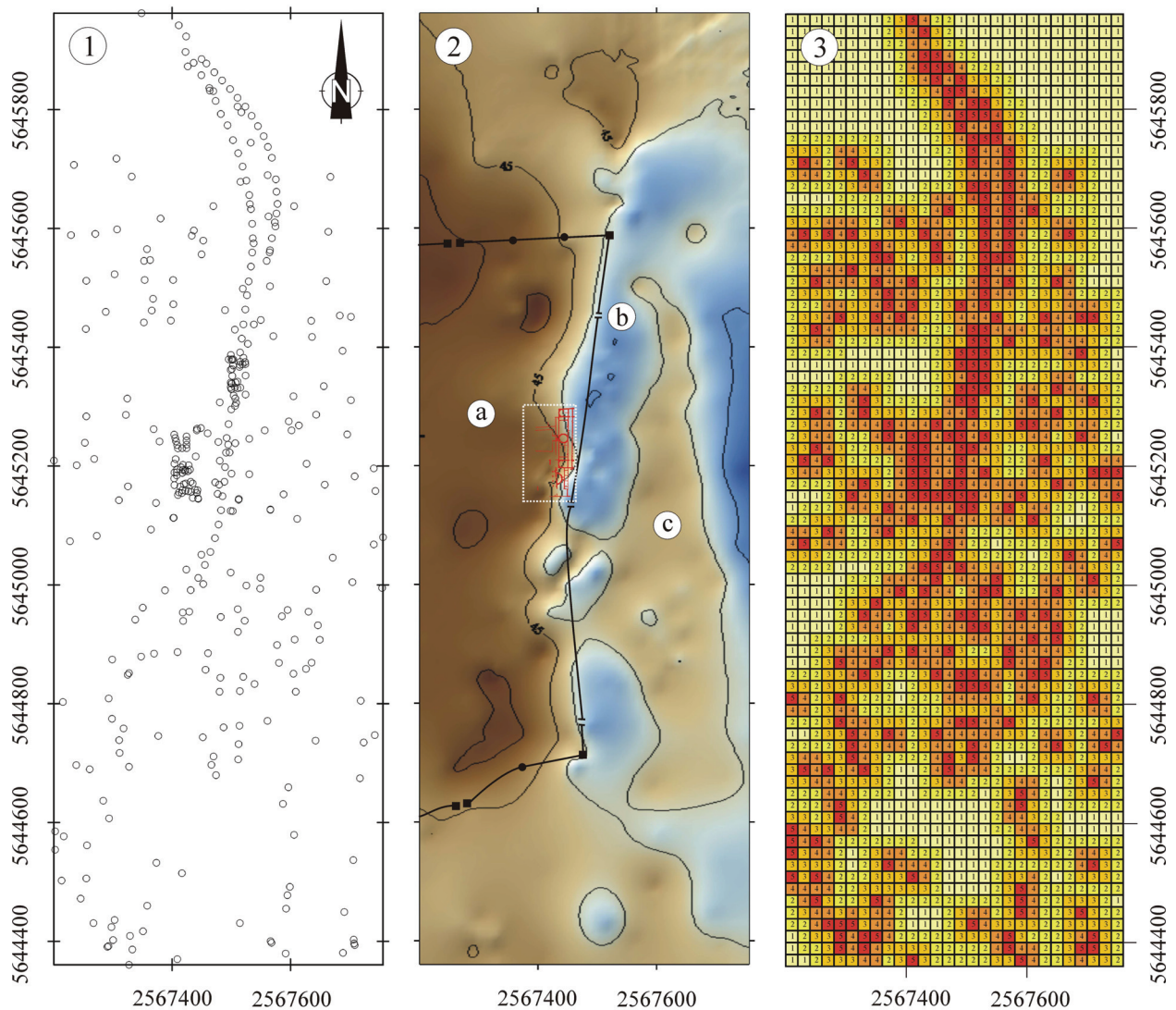


Abbildung 6.1: Lage der Datenpunkte, welche die Grundlage für die Berechnung des Oberflächenmodells bilden (1) und Aufsicht auf das Oberflächenmodell (2). Die rote Linie zeigt den Grundriss des Praetoriums. Das weiße Rechteck markiert das Arbeitsgebiet. Die schwarze Linie zeigt den Verlauf der römischen Stadtmauer. (a) markiert das Plateau der Niederterrasse, (b) den ehemaligen Seitenarm des Rheins und (c) die Halbinsel, die das Gebiet vom Hauptstrom trennte. (3) Qualitätsabschätzung des Oberflächenmodells. Rote Rechtecke (Ziffer 5) zeigen einen Abstand der Zelle zu einem Datenpunkt von <10 m, dunkelorange (Ziffer 4) von 10-20 m, hellorange (Ziffer 3) von 20-30 m, dunkelgelb (Ziffer 2) von 30-40 m und hellgelb von >40 m (nach Wiosna, 2010).

Eine Gitterzelle der Berechnung deckt eine Fläche von knapp 100 m² (10.01 m x 9.93 m) (Wiosna, 2010) ab. Anhand des Oberflächenmodells lässt sich die ursprüngliche Geländeform vor Beginn der in Köln sehr massiven, anthropogenen Überprägung, nachvollziehen. Das Arbeitsgebiet der Archäologischen Zone mit dem Praetorium und dem jüdischen Viertel liegt auf einer Terrasse, unmittelbar an der Kante des Hanges zu einem ehemaligen Seitenarm des Rheins. Die Terrasse (Abb. 6.1) entspricht aus geologischer Sicht dem Plateau der Niederterrasse. Diese Flussablagerungen aus dem Pleistozän bestehen in ihren jüngsten Einheiten aus zyklisch abgelagerten Sanden und Kiesen (Klostermann, 1992) und bildeten durch Ihre erhöhte Lage eine ideale Position für eine hochwassersichere Stadtanlage (Abb. 6.2).

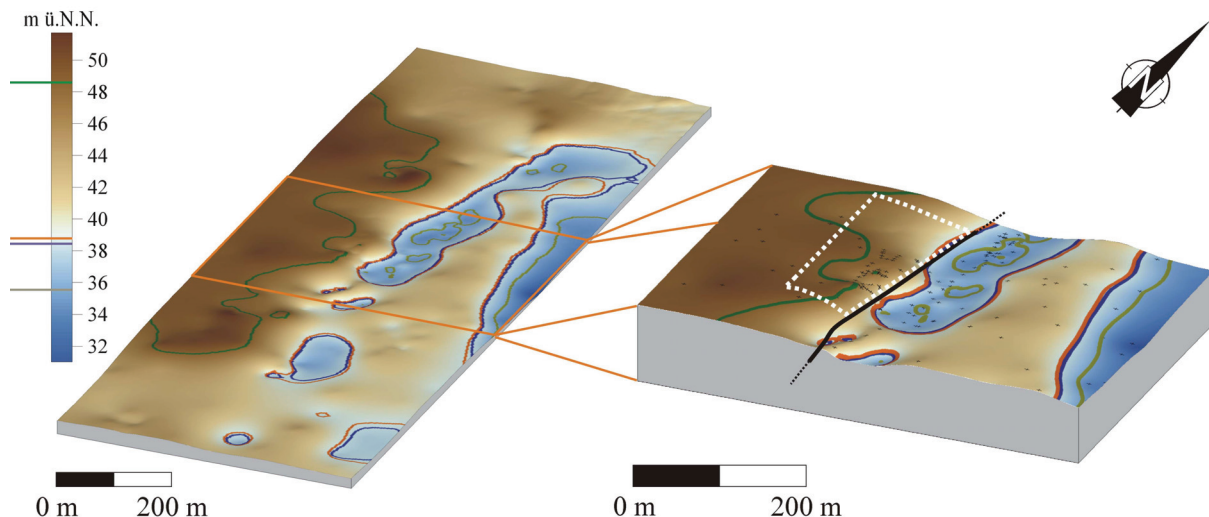


Abbildung 6.2: Perspektivische Ansicht des Oberflächenmodells des gewachsenen Bodens. Die Höhenlinien verschiedener Rheinpegel sind farblich markiert. Die grüne Linie ist der höchste gemessene Rheinpegel bei einem Hochwasser 1784, die orange Linie zeigt den mittleren Rheinpegel zu römischer Zeit (Köhler, 1941) an, die blaue Linie zeigt den heutigen mittleren Rheinpegel an und die olive Linie den absoluten Niedrigwasserstand von 2003 (Stadtentwässerungsbetriebe Köln, 2011)(nach Wiosna, 2010). Rechts: Vergrößerter Bereich des Rathausplatzes und des südlichen Praetoriums (weiße Linie), in schwarz ist der Verlauf der Stadtmauer eingezeichnet.

Abbildung 6.1 zeigt neben dem Plateau und dem Hang zum Rhein, einen ehemaligen Seitenarm des Rheins sowie eine Halbinsel. In archäologischen und stadtgeschichtlichen Untersuchungen werden dieser Rheinarm und die zugehörige Insel teilweise als Hafen mit vorgelagerter Insel interpretiert. Die Existenz eines durchgehenden Rheinarmes mit einer Insel kann durch die Höhendaten widerlegt werden. Die im Süden vom Hauptlauf getrennte Wasserfläche lag danach hinter einer natürlichen Halbinsel. Die Höhendaten zeigen, dass dieser abgetrennte Rheinarm bei mittlerem Wasserstand zu römischen Zeiten (nach Köhler (1941) bei 38.86 m ü.NN, Abb. 6.2) als Hafenbecken genutzt werden konnte. Die Zufahrt im Norden des Seitenarms zeigt jedoch im Modell bei Normalwasserstand, Wassertiefen von <0.5 m. Dies würde bedeuten, dass die Zufahrt für römische Schiffe mit einem Tiefgang von min. 0.5 m (Aßkamp und Schäfer, 2007), nur bei Hochwasserständen möglich gewesen wäre. Bei Niedrigwasser wurde der Seitenarm durch die Schwelle im Norden komplett vom Hauptlauf abgetrennt, so dass dieser nicht mehr für Schiffe zugänglich war (Abb. 6.2). Diese zumindest periodische Unbenutzbarkeit führte dazu, wahrscheinlich im Zusammenspiel mit der expandierenden Stadt, dass das Gebiet schon Ende des 1. Jahrhunderts verfüllt wurde. Die Kölner Hafenanlage lag damit ab dem 2. Jahrhundert direkt am Hauptlauf des Flusses (Schütte und Gechter, 1999).

Diese Tatsache ändert jedoch nichts an der exponierten Lage der römischen Gebäude um das Praetorium an der beschriebenen Hangkante. Aus der Baugeschichte des Praetoriums (vgl. Kapitel 5.2) wird zudem deutlich, dass die Konstruktionen im Laufe der Zeit immer weiter ausgedehnt wurden und sich über die Hangkante hinaus nach Osten verlagerten. Dies führte dazu, dass neben der schwierigen topographischen Situation, durch die Gründung von Gebäudeteilen in künstlichen Auffüllungen eine erschwerte Baugrundsituation geschaffen wurde. Wichtigstes Ergebnis dieser Untersuchung sind jedoch die Erkenntnisse über die natürliche Hangtopographie im Bereich des Arbeitsgebietes, die entscheidenden Einfluss auf die Geometrie des geotechnischen Modells haben.

6.1.2 Untergrundmodell

Die Topographie des Arbeitsgebietes wurde durch die Erkenntnisse über die Zusammensetzung des Untergrundes ergänzt. Hierzu wurden im Rahmen der Arbeit von Wiosna (2010) Ost-West verlaufende 2D-Schnitte durch das Oberflächenmodell (Abb. 6.3) gelegt, von denen einer, auf Höhe des Praetoriums als Grundlage für ein vereinfachtes Untergrundmodell ausgewählt wurde (Abb. 6.3). Für die Berechnungen wurde ein Finite-Element-Modell mittels der Software Geostudio 2007 (Geoslope, 2007) erstellt.

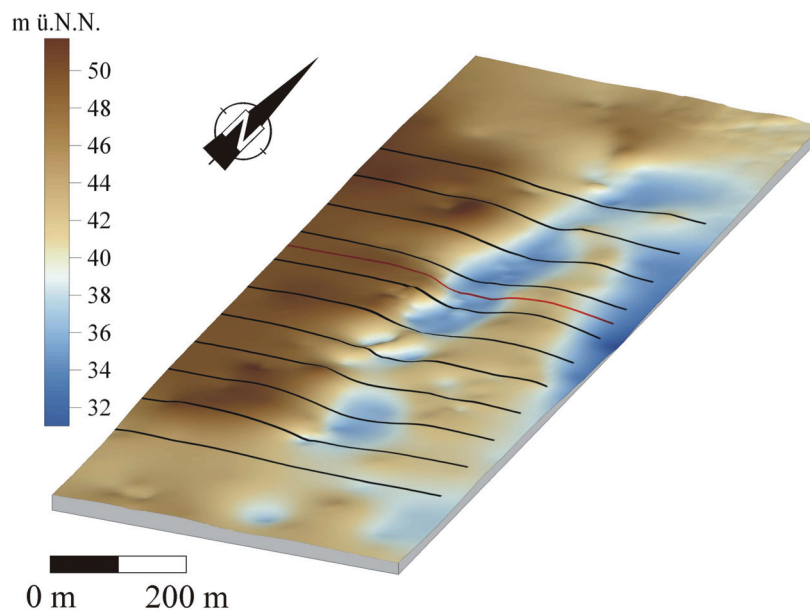


Abbildung 6.3: Perspektivische Ansicht des Oberflächenmodells mit der Lage der 2D-Schnitte, welche die Grundlage für das Untergrundmodell bilden. In rot markiert ist der Schnitt auf Höhe des Octogons im Praetorium. (nach Wiosna, 2010).

GRUNDLAGEN DER FINITE-ELEMENTE-METHODE

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein Verfahren zur näherungsweisen Lösung komplexer Differentialgleichungen (Steinbuch, 1998). Die FEM basiert auf der Grundlage, Modelle in eine beliebig große Anzahl von einzelnen Elementen zu unterteilen, um somit komplexe Problemstellungen lösen zu können. Die einzelnen Elemente werden hierbei mit einer diskreten Anzahl von Parametern beschrieben. Nach Steinbuch (1998) wird dieser Vorgang als Diskretisierung eines Kontinuums bezeichnet. Jeder Körper und jedes Objekt lässt sich nach Steinbuch (1998) in Teilbereiche aufteilen, die sich kontinuierlich fortsetzen. Diese Teilbereiche werden als Kontinua bezeichnet, welche im Fall der zweidimensionalen Modellierung drei oder viereckige Zellen sind, die über Ihre Eckpunkte mit anderen Zellen zu einem Gitternetz verknüpft werden. Durch diese Einteilung wird das Problem numerisch fassbar und kann näherungsweise gelöst werden. Ein finites Problem wird in ein diskretes umgewandelt. Nachdem ein Modell diskretisiert wurde, werden vor der Berechnung Randbedingungen sowie Materialeigenschaften für die einzelnen Teilbereiche bzw. Elemente festgelegt. Bei der Berechnung der Einzelprobleme wird daraus ein lineares Gleichungssystem gebildet, welches numerisch gelöst werden kann. Auf diese Aufteilung folgt ein erneutes Zusammensetzen der Einzelresultate, was einer näherungsweisen Lösung des ursprünglichen Problems entspricht. Die Qualität dieser Lösung ist unmittelbar von der Aufteilung des Modells abhängig. Benutzt man eine große Anzahl kleiner Elemente nähert

man sich immer weiter den realen Bedingungen an. Da es jedoch darum geht ein Problem zu vereinfachen, um es überhaupt lösen zu können, ist es sinnvoll, zunächst nur die wesentlichen Eigenschaften wie die Geometrie, die Randbedingungen und die wichtigsten Materialparameter zu verwenden (Geoslope, 2007).

VEREINFACHTES MODELL

Für das erste vereinfachte Modell wurden in der Diplomarbeit von Wiosna (2010) zunächst nur zwei geologische Einheiten verwendet. Die Liegende Einheit im Arbeitsgebiet wird von tertiären Sedimenten gebildet. Die Oberkante dieser Schicht wurde anhand der Bohrungen ermittelt. Die tertiären Schichten im Arbeitsgebiet werden von Sanden und teilweise sandigen Kiesen aufgebaut. Im Hangenden des Tertiärs folgen quartäre Ablagerungen, welche die natürliche Oberfläche bilden. Die Topographie des gewachsenen Bodens und damit die Oberkante der anstehenden Niederterrasse, wurde über das Oberflächenmodell ermittelt. Die Niederterrasse ist die jüngste von insgesamt 13 pleistozänen Terrassen, die von der Maas und dem Rhein abgelagert wurden und die in der östlichen Niederrheinischen Bucht nachgewiesen werden können (Boenigk, 1978; Boenigk und Frechen, 2006). Die vom Rhein abgelagerte Niederterrasse wird morphologisch (u.a. Wunsdorf und Fliegel, 1910; Ruland, 1926) bzw. stratigraphisch durch das Auftreten vulkanischen Materials der Laacher-See-Eruption (u.a. Frechen und van den Boom, 1959) in die Jüngere und Ältere Niederterrasse unterteilt.

Die Ältere Niederterrasse besteht aus zyklisch abgelagerten Sand- und Grobkiespaketen (Thoste, 1974), die im internen Aufbau teilweise Schluff- und Tonbänder zeigen. In den sandigen Partien der Älteren Niederterrasse finden sich Kreuz- und Schrägschichtungen (Ruland, 1926). Die Stratigraphie der Älteren Niederterrasse deutet auf ein Ablagerungsmilieu in einem verzweigten Flusssystem hin (Thoste, 1974). Die Oberfläche der Älteren Niederterrasse wurde nach der Ablagerung im links-rheinischen Raum durch Altarme des Rheins, sowie die Rinnen des verzweigten Flusssystems überprägt (Thoste, 1974). Die Jüngere Niederterrasse ist klar durch ihre bimsführenden Schichten von der Älteren Niederterrasse zu trennen (Boenigk und Frechen, 2006).

Die Jüngere Niederterrasse wird von Sand- und Kiesabfolgen aufgebaut, in denen immer wieder Tuff- und Bimslagen vorkommen können (Thoste, 1974; Klostermann, 1992). Diese jüngsten Sedimente der Niederterrasse bilden unter den anthropogenen Auffüllungen den anstehenden, natürlichen Untergrund. Bei eigenen sedimentologischen Untersuchungen konnten Bimslagen in Sandvorkommen nachgewiesen werden.

Den Abschluss der Jüngeren Niederterrasse bildet der so genannte Hochflutlehm. Hierbei handelt es sich um Ablagerungen aus tonigem, sandigem Schluff mit einer mittleren Mächtigkeit von 1-3 m. Dieses Material wurde zum Teil zu römischen Zeiten umgelagert und als Planierschicht genutzt (pers. Komm. K. Kliemann, 2009).

Mit der Oberflächentopographie sowie den Materialeigenschaften der zwei verwendeten Einheiten, wurde ein vereinfachtes Finite-Element-2D-Modell des Areals um den Hang zum ehemaligen Rheinarm, erstellt (Abb. 6.4). Das Modell hat eine Tiefenerstreckung von knapp 100 m (-50~50 m.ü.N.N.) und eine Ost-Westausdehnung von 600 m. Die 2D Schnitte wurden hierbei nach Osten und Westen verlängert, um Randeffekte in späteren Berechnungen zu minimieren (Wiosna, 2010).

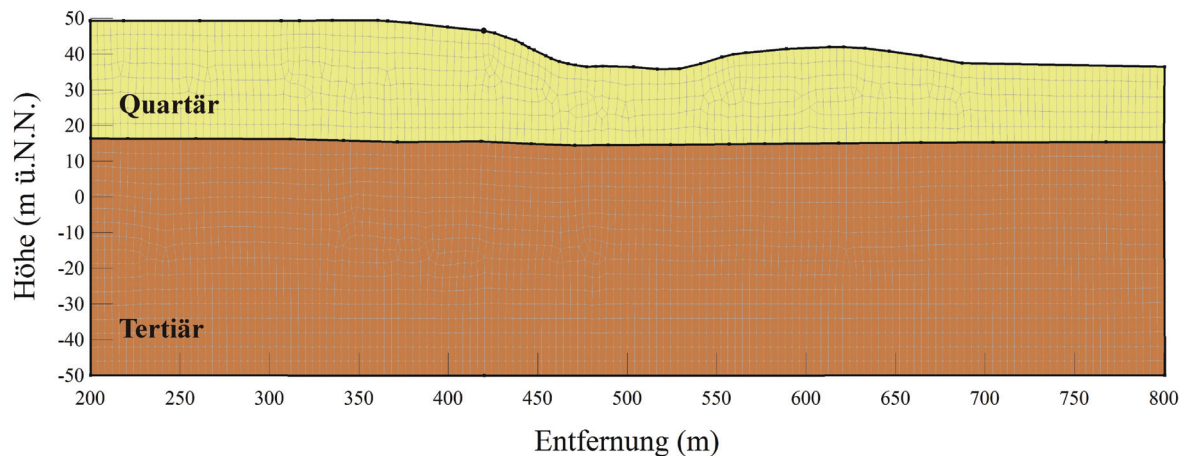


Abbildung 6.4: Vereinfachtes Modell des Arbeitsgebietes und des Rheinhanges (Wiosna, 2010).

Das Modell wurde mit dem Programm Geostudio 2007 erstellt. Dazu wurden zunächst die bekannten geometrischen Grenzen des Gebietes als Regionen definiert und in ein Gitternetz aus drei und viereckigen Elementen umgewandelt. Den Regionen im Netz konnten nun Materialeigenschaften zugewiesen werden. Tabelle 6.1. zeigt die verwendeten Materialparameter.

Tabelle 6.1: Materialkennwerte des vereinfachten Modells des Rheinhanges (nach Wiosna, 2010).

| Einheit | Wichte (kN/m ³) | Poissonzahl | Kohäsion (kPa) | Winkel der inneren Reibung (°) |
|---------|-----------------------------|-------------|----------------|--------------------------------|
| Quartär | 20.5 | 0.21 | 0 | 36 |
| Tertiär | 19.0 | 0.21 | 0 | 35 |

MODELL MIT AUFFÜLLUNGEN

Schon während der römischen Besiedelungsphase von Köln kam es zu massiven Eingriffen in den natürlichen Untergrund. Durch Abtragung und Aufschüttung wurde die natürliche Topographie, besonders im Bereich des Praetoriums (vgl. Kap. 5.2) deutlich verändert. Um diese Veränderungen zu berücksichtigen, wurde von Wiosna (2010) ein erweitertes Modell erstellt, das neben den natürlichen Ablagerungen aus dem Tertiär und Quartär auch Sedimente des ehemaligen Rheinarmes, umgelagerten Hochflutlehm und Schuttauuffüllungen berücksichtigt (Abb. 6.5). Vorbild für die durch die Aufschüttungen veränderte Hangtopographie waren archäologische Schnitte durch das Praetorium, die im Zuge der Auswertung der Ergebnisse der ersten Grabungskampagne in den 1950er Jahren von Precht (1973) erstellt wurden.

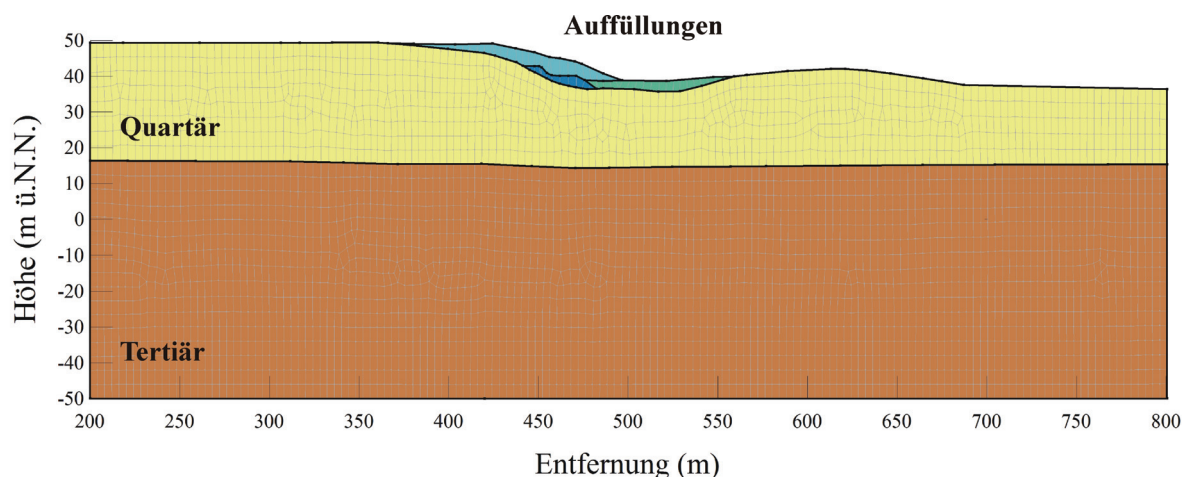


Abbildung 6.5: Vereinfachtes Modell des Arbeitsgebietes und des Rheinhanges mit anthropogenen Auffüllungen (Wiosna, 2010).

Diese zeigen deutlich die Veränderung der Baugrundtopographie, durch Abgrabung und Aufschüttung in verschiedenen Bereichen des Hanges. Das Praetorium und seine Peripheriegebäude dehnten sich in den verschiedenen Bauphasen vom 1. – 4. Jahrhundert immer weiter nach Osten über die Kante des Rheinhanges aus. Diese Hangkante wurde durch künstliche Aufschüttungen immer weiter nach Osten verschoben. Die o.g. Aufschüttungen wurden daher im Modell vor allem im Hangbereich hinzugefügt. Die Materialparameter dieser Einheiten können Tab. 6.2 entnommen werden.

Tabelle 6.2: Materialkennwerte des Modells des Rheinhanges mit Auffüllungen (nach Wiosna, 2010).

| Einheit | Wichte (kN/m ³) | Poissonzahl | Kohäsion (kPa) | Winkel der inneren Reibung (°) |
|---------------|-----------------------------|-------------|----------------|--------------------------------|
| Auffüllung | 17.00 | 0.21 | 0 | 32.5 |
| Hafensediment | 14.25 | 0.23 | 10 | 27.5 |
| Hochflutlehm | 19.00 | 0.23 | 20 | 25.0 |
| Quartär | 20.50 | 0.21 | 0 | 36.0 |
| Tertiär | 19.00 | 0.21 | 0 | 35.0 |

6.1.3 Erweitertes Untergrundmodell

Um einen detaillierteren Einblick in die Zusammensetzung des Untergrundes des Arbeitsgebietes zu bekommen, wurden im Rahmen der Studie verschiedene eigene Felduntersuchungen durchgeführt (Abb. 6.6). Neben Rammkernsondierungen im Praetorium wurden im Bereich des Rathausplatzes Sondierungen mit einem Handbohrstock sowie detaillierte geotechnische Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der Firma Kühn Geoconsult GmbH durchgeführt. Mit dem Fortschreiten der archäologischen Grabung wurde an verschiedenen Stellen der gewachsene Boden aufgeschlossen und konnte untersucht werden. Abb. 6.6 zeigt einen Überblick über die Sedimentuntersuchungen.

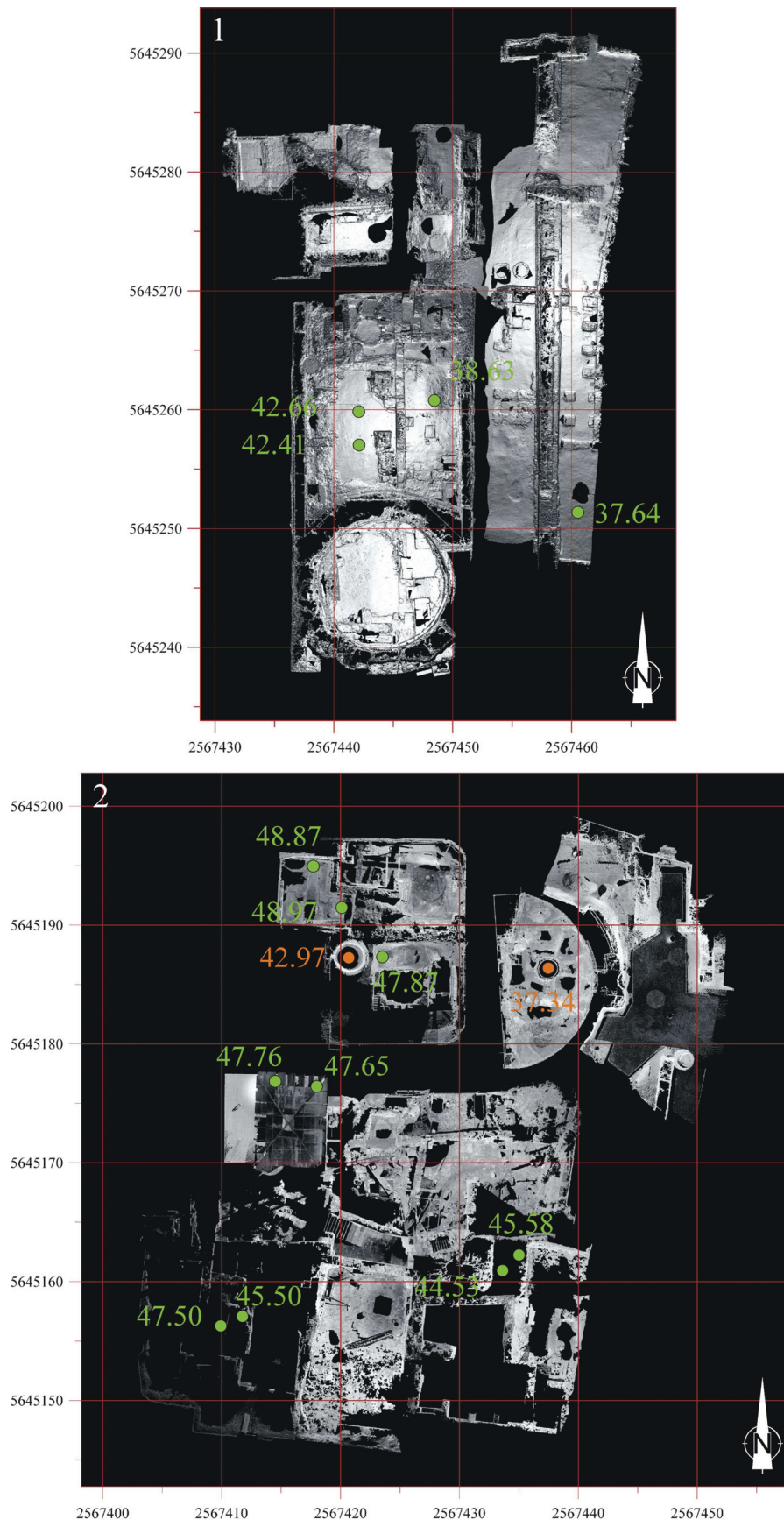


Abbildung 6.6: Lage der Sedimentuntersuchungen im Praetorium (1) und auf dem Rathausplatz (2) bei denen der gewachsene Boden direkt (grün) oder indirekt (orange) nachgewiesen werden konnte. Angegeben ist die jeweilige Höhenlage der Oberkante des gewachsenen Bodens in m. ü.N.N..

In einer ersten Feldkampagne wurden im Praetorium vier Rammkernsondierungen abgeteuft (Abb. 6.7). Mit allen vier Sondierungen konnten unter den anthropogenen Auffüllungen die Sedimente der Niederterrasse erreicht werden. Die Sedimente der Niederterrasse zeigen im Bereich des Praetoriums die erwartete Zusammensetzung aus grobsandigen Kiesen und sandigen Kiesen. Die Sondierungspunkte wurden, unter Berücksichtigung der archäologischen Gegebenheiten, über die gesamte Ost-West Erstreckung des Praetoriums verteilt (Abb. 6.7), um den Verlauf des gewachsenen Bodens im Hangbereich zu erfassen. Im westlichen Bereich lagen Daten über die Tiefenlage des gewachsenen Bodens aus archäologischen Grabungsschnitten von Precht (1971) vor. Diese decken sich mit den Ergebnissen der Sondierungen. Die östlichen Sondierungen erbrachten neue Erkenntnisse über die Tiefenlagen der Niederterrasse, da in diesem Bereich der gewachsene Boden während der archäologischen Ausgrabung nicht erreicht wurde. Abbildung 6.7 zeigt eine Ost-West Anordnung der Bohrprofile mit dem interpolierten Verlauf des natürlichen Hanges. Die Ergebnisse der Sondierungen im Praetorium konnten schon im Modell mit Auffüllungen von Wiosna (2010) genutzt werden.

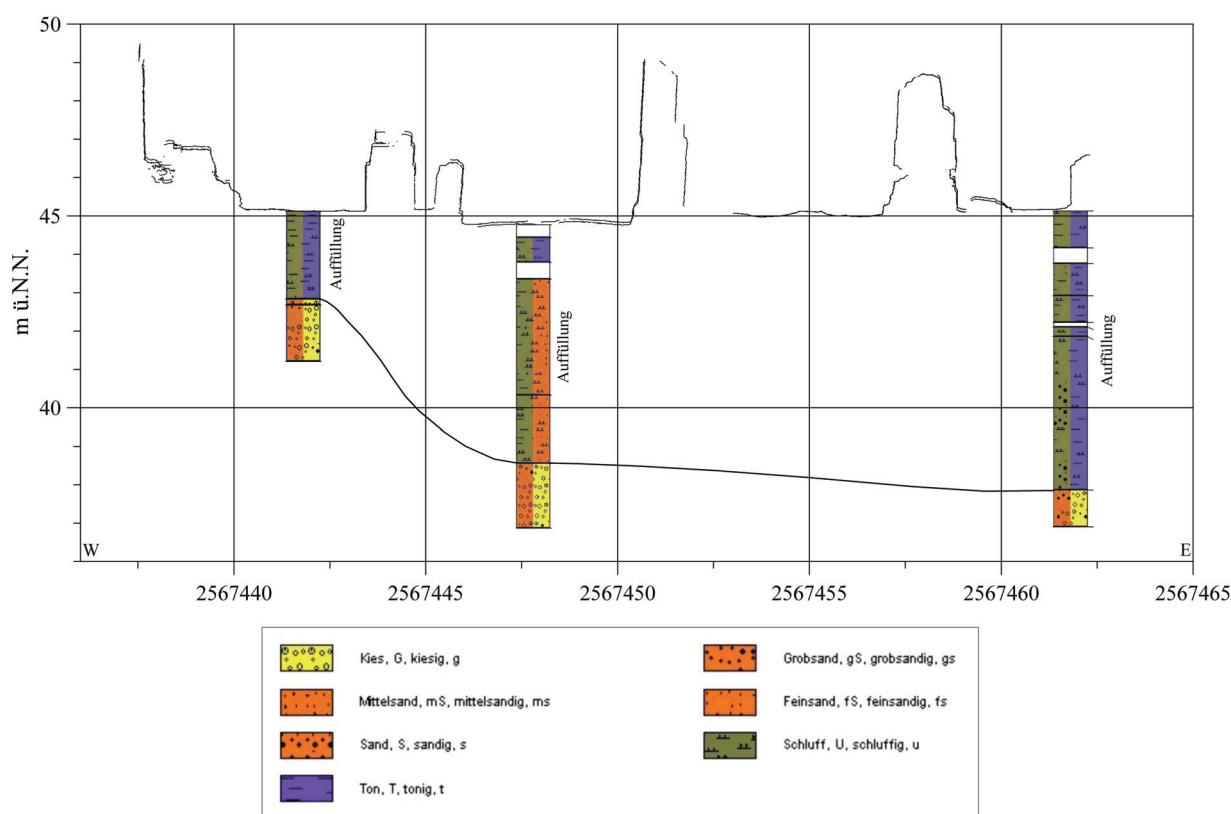


Abbildung 6.7: Bohrprofile der Sondierungen aus dem Praetorium mit interpoliertem Verlauf des natürlichen Hanges. Die Oberfläche wurde aus einem Schnitt durch die 3D-Punktwolke bei den Hochwertkoordinaten 5645257.43 extrahiert.

Im Verlauf der archäologischen Grabung wurde der gewachsene Boden in mehreren Profilen im Bereich des Rathausplatzes freigelegt (Abb. 6.6, 2). In der Kloake und im römischen Brunnen konnte Material indirekt als Eintrag aus der direkten Umgebung nachgewiesen werden. Dieses Material konnte durch Vergleiche mit dem Material aus den anstehenden Profilen dem natürlichen Untergrund zugeordnet werden. Zusätzliche Rammkernsondierungen brachten weitere Erkenntnisse zur Zusammensetzung des gewachsenen Bodens im Arbeitsgebiet. Im zentralen Bereich des Rathausplatzes wurde im nördlichen Flügel eines

antiken Vorgängerbaus der Synagoge der gewachsene Boden unter einem zerstörten Hypocaustfussboden freigelegt (Abb. 6.8).

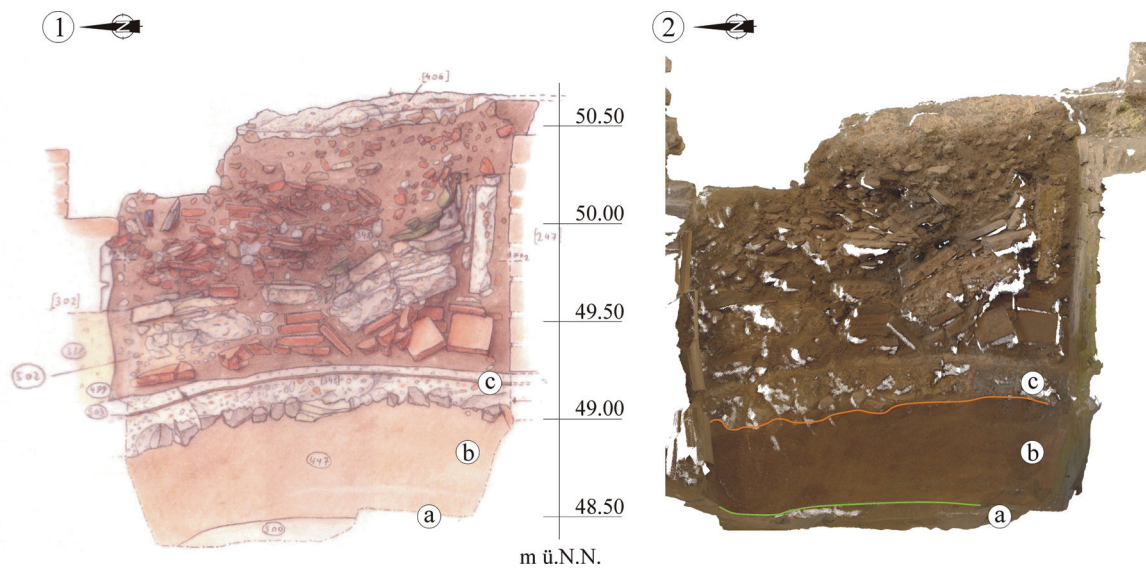


Abbildung 6.8: „Profil an der Hypocauste“. (1) Archäologische Profilzeichnung, (2) Orthophoto der 3D-Punktwolke. Im unteren Bereich steht Fein-Mittelsand an (a), der von einer sandig-tonigen Schluffschicht (b) überdeckt wird. Darüber folgt eine anthropogene Schuttschicht über einem antiken Unterboden(c). Die grüne Linie markiert die Obergrenze des Sandes, die orange Linie die Oberkante des Schluffes (Zeichnung: Archäologische Zone, 2009).

Im Bereich der Hypocauste wurde in einer Höhe von 48.47 m ü.NN ein fein- bis mittelkörniger Sand nachgewiesen. Dieser nahezu kohäsionslose Sand zeigt in einigen Bereichen Bimsvorkommen. Dies lässt eine Zuordnung zu den Sedimenten der Jüngeren Niederterrasse zu. Die Unterkante des Sandes konnte nicht ermittelt werden. Eine Rammkernsondierung vor dem Profil konnte lediglich eine Mindestmächtigkeit von 0.8 m nachweisen (Abb. 6.9).

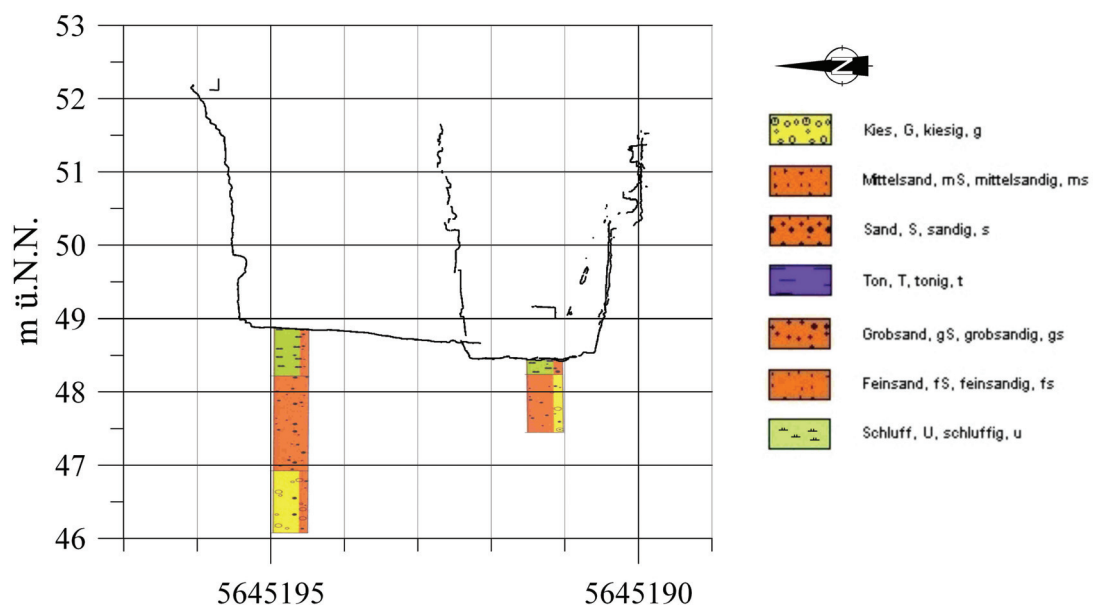


Abbildung 6.9: Bohrprofile der Rammkernsondierungen am Profil an der Hypocauste. Die Oberfläche wurde aus einem N-S Schnitt bei 2567417.62 (GK) und einem N-S Schnitt bei 2567419.42 (GK) durch die 3D-Punktwolke extrahiert.

Nordwestlich des Profils wurde eine weitere Rammkernsondierung abgeteuft, mit welcher der Sand mit einer Mächtigkeit von 1.3 m in einer Höhe von 46.92 m ü.NN (Unterkante) über den typischen Terrassenkiesen belegt werden konnte (Abb. 6.9). Im Hangenden des Sandes steht ein sandig-toniges Schluffpaket an, das zumindest im unmittelbaren Kontakt zu dem darüber liegenden Unterboden der Hypocaustanlage, anthropogen überprägt wurde. Im unteren Bereich der Sedimente sind Schichtungen zu finden, die auf eine natürliche Ablagerung an Ort und Stelle hindeuten. Aus dieser Schicht wurde eine Holzkohleprobe entnommen, für die mit der bereits angesprochenen ^{14}C -Datierung ein Alter von 1142 - 971 RCYBP (Radiokarbon Jahre vor heute, Referenzjahr: 1950, nach Stuiver und Polach, 1977) ermittelt wurde. Die Datierung ordnet die Schicht mit einer Wahrscheinlichkeit von 93.4% in den Zeitraum zwischen 808 und 979 n. Chr. ein. Aus archäologischen Gesichtspunkten kann die Probe nur bei massiven Reperaturmaßnahmen nach dem Zusammenbruch der Hypocauste eingetragen worden sein. Ein Widerspruch ergibt sich hierbei mit dem bislang angenommenen Reperaturzeitraum um 800 n. Chr., hiernach ist dieser eher später anzusetzen. Der nachgewiesene Sand wurde zusammen mit einem gleichartigen Sand aus einem weiteren Profil östlich der Kloake im Rahmen einer Bachelorarbeit (Esser, 2011) untersucht. Die sedimentologische Aufnahme und Auswertung erfolgte in Zusammenarbeit mit der Firma Kühn Geoconsult GmbH.

Im Profil östlich der Kloake (Abb. 6.10) konnte ebenfalls ein nahezu kohäsionsloser Fein-Mittelsand in einer Höhe von ca. 48.00 m ü.NN nachgewiesen werden.

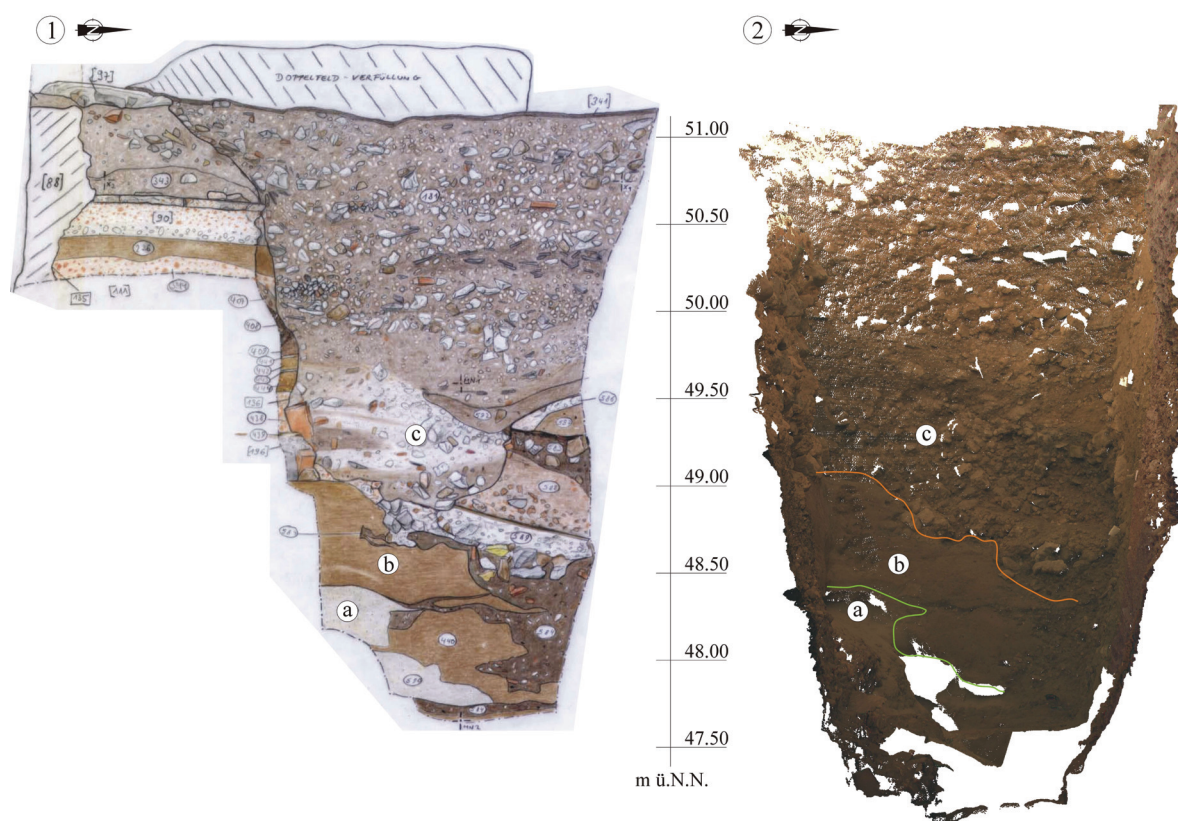


Abbildung 6.10: „Profil an der Kloake“. (1) Archäologische Profilzeichnung, (2) Orthophoto der 3D-Punktwolke. Im unteren Bereich steht Fein-Mittelsand an (a), der von sandig-tonig-schluffigem Material (b) überdeckt wird. Unklar ist ob Teile dieser Schicht in situ anstehen. Darüber folgen anthropogene Auffüllungen (c). Die grüne Linie markiert die Obergrenze des Sandes, die orange Linie Grenze zur anthropogenen Auffüllung (Zeichnung: Archäologische Zone, 2008).

Im oberen Bereich ist der Sand mit sandigen, tonigen Schluffablagerungen verzahnt, auf die im Hangenden anthropogene Auffüllungen folgen. Während der Sand natürlich abgelagerte Bimsbänder und deutliche Schichtungen zeigt, ist der auflagernde Schluff zumindest teilweise anthropogen überprägt. Die Unterkante des Sandes wurde durch eine Rammkernsondierung bei 46.3 m ü.NN bestimmt (Abb. 6.11). Darunter finden sich die typischen Terrassenkiese. Die Übergangszone ist durch einen kontinuierlichen Korngrößenzuwachs über Grobsand und Feinkies geprägt, der schon bei Handsondierungen im Jahr 2010 festgestellt wurde.

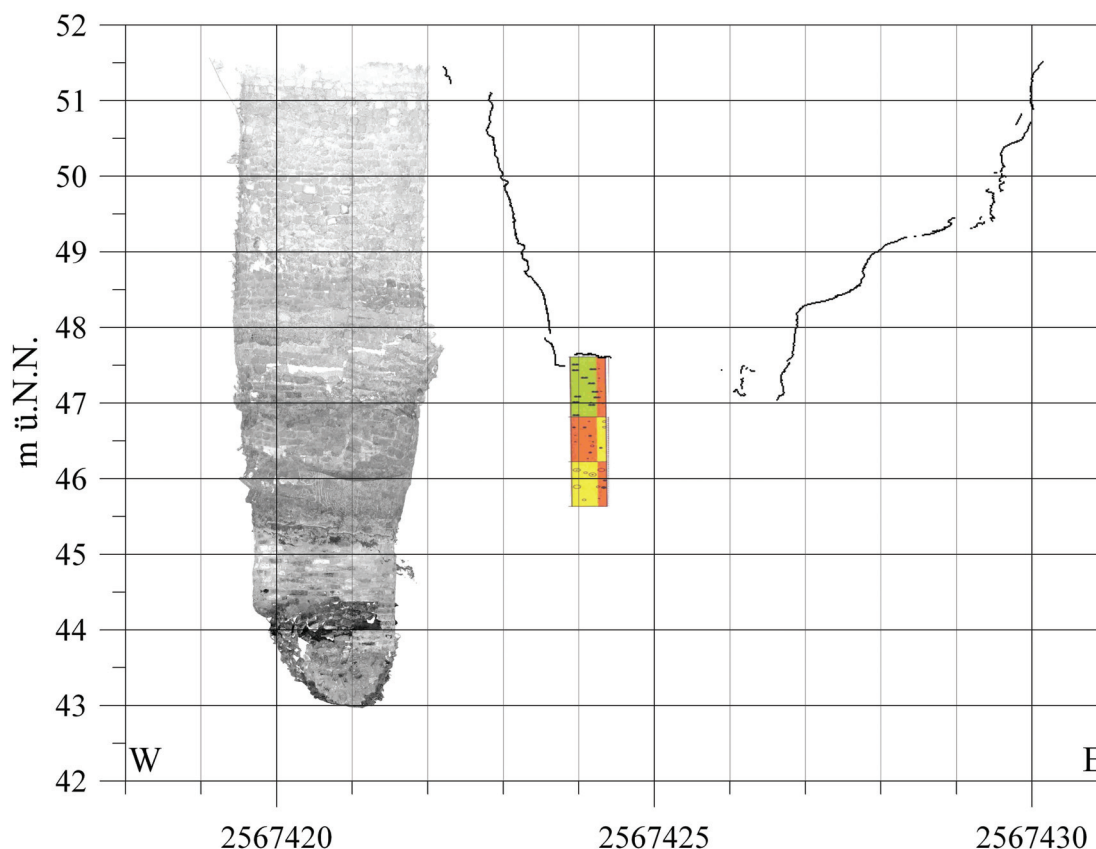


Abbildung 6.11: Bohrprofile der Rammkernsondierungen am Profil an der Kloake. Die Oberfläche wurde durch einen W-E Schnitt bei 5645187.39 durch die 3D-Punktwolke extrahiert. In Graustufen ist die Punktwolke der nördlichen Hälfte der Kloake dargestellt. Die Legende kann Abb. 6.9 entnommen werden.

Neben den direkten Befunden in den Profilen an der Hypocauste und der Kloake, konnte ein ähnlicher Sand indirekt im Brunnen auf dem Rathausplatz sowie im untersten Bereich der Kloake, nachgewiesen werden. In der Kloake drang der Sand durch Schadstellen in den Wänden sowie unter den Wänden in den Innenraum ein. Im Brunnen wurde der Sand während der archäologischen Ausgrabung der Füllung gefunden. In einer Ausgrabungstiefe von 13.2 m musste die Grabung wegen des Eindringens von „...immer flüssigerem Wasser-Sand-Gemisches“ (Grabungsdokumentation Brunnen, 2008) abgebrochen werden. Im Brunnen liegt also ein Fein-Mittelsand unter Grundwassereinfluss vor. Während der Feldarbeiten fiel auf, dass der Sand nahezu keine Kohäsion aufweist und bei Störung seiner Lagerung sehr mobil reagiert. Einmal angeschnitten wurde der Sand durch leichteste Erschütterungen mobilisiert. Diese Tatsache veranlasste die genaue Untersuchung des Verflüssigungspotentials des Sedimentes. Neben den Rammkernsondierungen wurden im Gelände weitere Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der Firma Kühn Geoconsult GmbH durchgeführt. Abbildung 6.12 und 6.13 zeigen die Lage der Felduntersuchungen und die Probenentnahmepunkte im Bereich der Hypocauste und der Kloake.

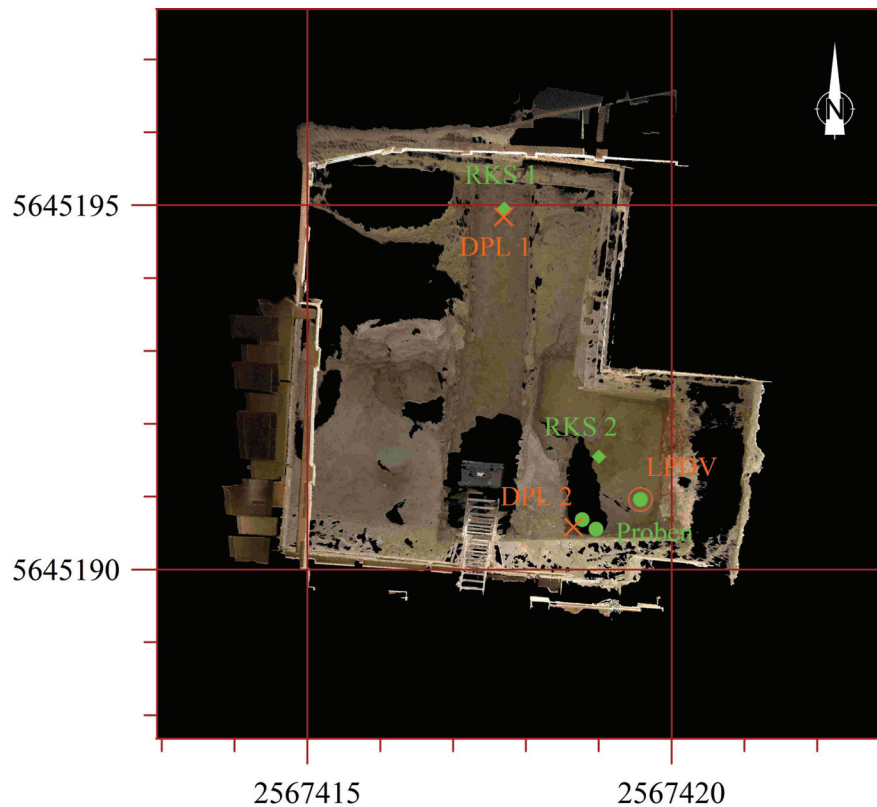


Abbildung 6.12: Positionen der Rammkernsondierungen (grüne Rauten, RKS 1 und 2), der Rammsondierungen (orange Kreuze, DPL 1 und 2), des Lastplattendruckversuches (oranger Kreis, LPDV sowie der Probenentnahmestellen (grüne Punkte) im Bereich der Hypocauste.

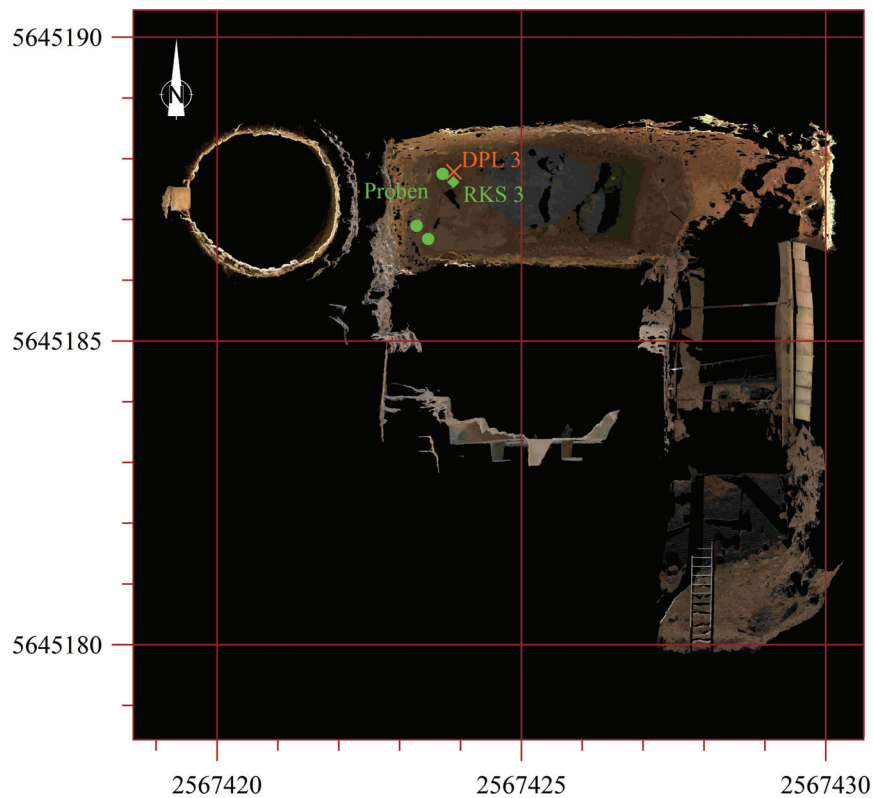


Abbildung 6.13: Positionen der Rammkernsondierung (grüne Raute, RKS 3), der Rammsondierung (orange Kreuz, DPL 3) sowie der Probenentnahmestellen (grüne Punkte) im Bereich der Kloake.

Vor dem Profil an der Hypocauste, nord-westlich davon und am Profil an der Kloake wurden leichte Rammsondierungen (DPL, „Dynamic Probing Light“) vorgenommen. Vor dem Profil an der Hypocauste wurde ein dynamischer Lastplattendruckversuch durchgeführt. Zur genaueren Untersuchung im Labor wurde vor der Hypocauste eine Probe zu Bestimmung der Korngrößen und der Verdichtungsfähigkeit sowie zwei ungestörte Proben mit einem Ausstechzylinder genommen. Das Profil an der Kloake wurde in einer vorangegangenen Feldkampagne beprobt, um die Korngrößenverteilung zu bestimmen. Hier wurde eine zusätzliche Probe mittels Ausstechzylinder genommen. Abb. 6.14 zeigt die Korngrößenverteilung der Sande aus den Profilen an der Hypocauste, an der Kloake sowie eine im Vorfeld genommene Probe aus dem Bodenbereich der Kloake.

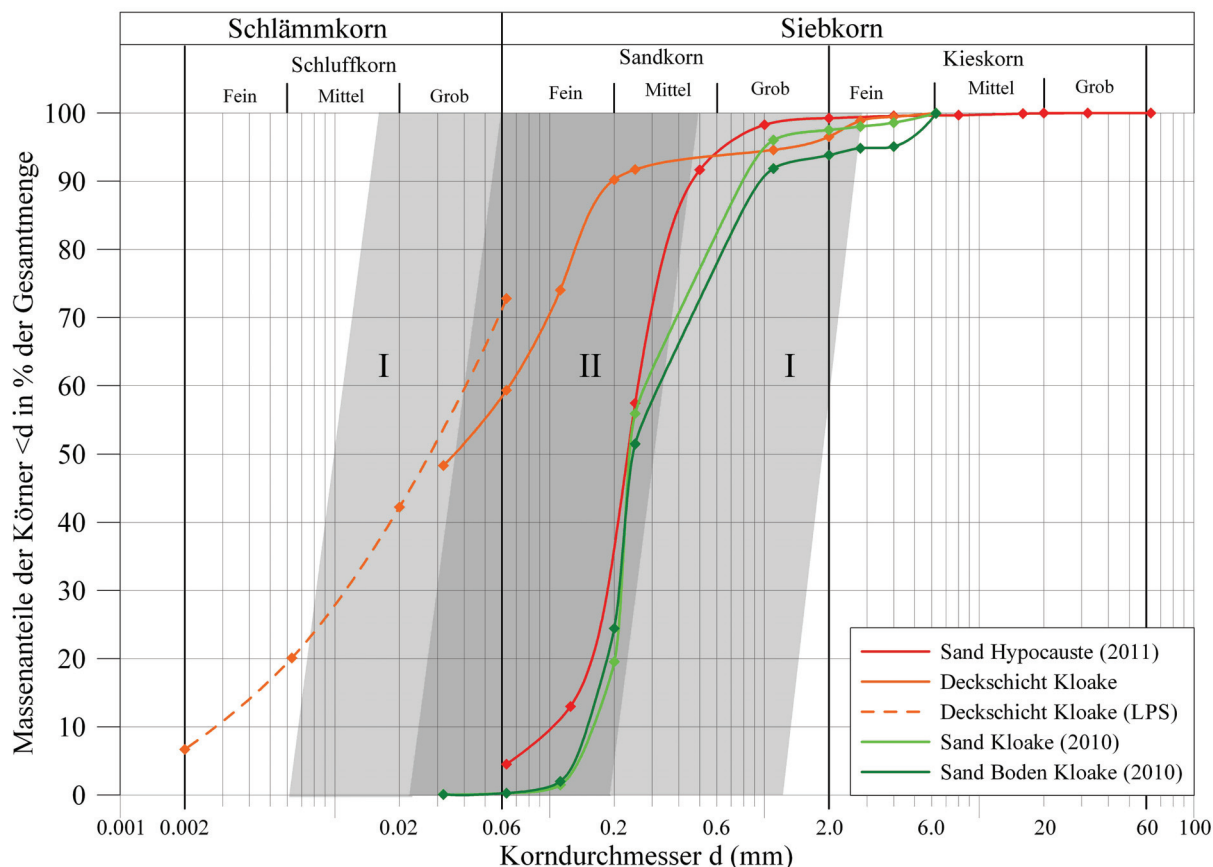


Abbildung 6.14: Korngrößenverteilung der Proben aus den Profilen an der Hypocauste (rot), der Kloake (orange und hellgrün) sowie aus dem Inneren der Kloake (dunkelgrün). Grau hinterlegt sind die nach KTA 2201.2 verflüssigungsgefährdeten Bereiche 1 und 2 (nach Esser, 2011).

Die Ergebnisse der Rammkernsondierungen zeigen an allen Lokalitäten eine Fining-upward Sequenz von den Terrassenkiesen über die Fein-Mittelsande zu den abschließenden tonig-sandigen Schluffablagerungen (Abb. 6.11).

Die Ergebnisse der Rammsondierungen (Abb. 6.15) zeigen, dass bei den Versuchen im direkt anstehenden Sand (vor der Hypocauste (DPL 2) und vor der Kloake (DPL 3)) nur niedrige Schlagzahlen (<10) benötigt werden und ein geringer Bodenwiderstand vorliegt. Die Schlagzahlen erhöhen sich erst am Übergang der Sande zu den Terrassenkiesen bzw. bei DPL 2 nahe des anzunehmenden Übergangs zu den Terrassenkiesen. Das Ergebnis der Rammsondierung nordwestlich der Hypocauste zeigt eine erhöhte Schlagzahl für den oberen Bereich des Mittelsandes. Dies weist auf eine dichtere Lagerung in der ungestörten

Stratigraphie hin. Aus dem dynamischen Lastplattendruckversuch lässt sich ein Verformungsmodul von $E_{vd}=14.1 \text{ MN/m}^2$ bestimmen. Dieser Wert liegt deutlich unter den erwarteten Werten für Bodengruppe SE (Enggestufte Sande nach DIN 18196). Dies liegt an der gestörten Lagerung an der Oberfläche, wodurch das Material beim Versuch zur Seite ausweichen konnte (Esser, 2011).

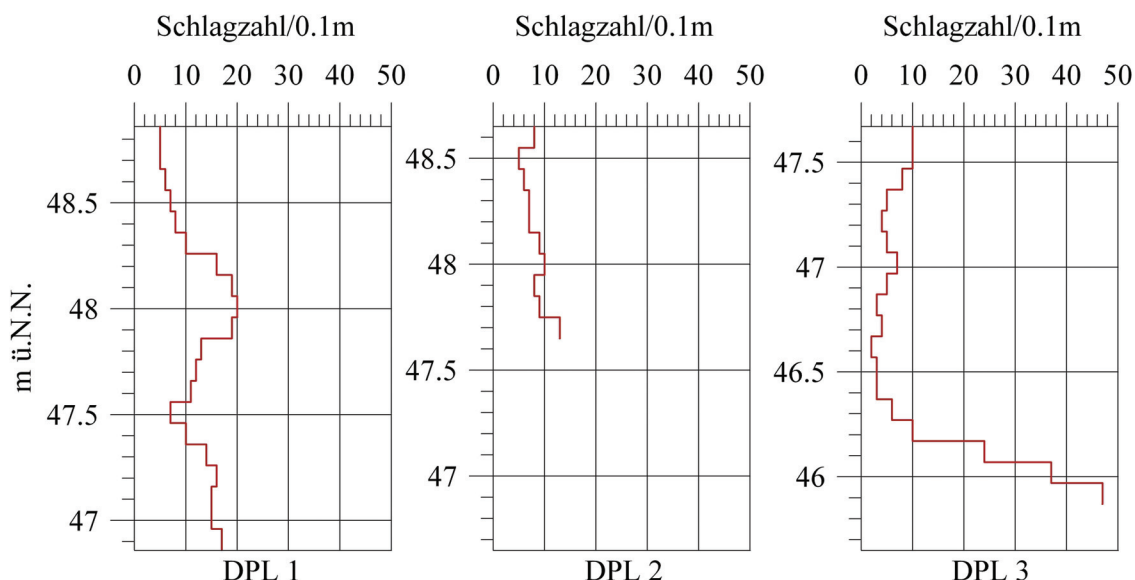


Abbildung 6.15: Ergebnisse der leichten Rammsondierungen nordwestlich der Hypocauste (DPL 1), direkt an der Hypocauste (DPL 2) und an der Kloake (DPL 3).

Anhand der im Gelände gewonnenen Proben wurden im Laborversuch neben der Korngrößenverteilung weitere Materialkennwerte bestimmt. Tabelle 6.3 fasst die Ergebnisse für die jeweiligen Lokalitäten zusammen.

Tabelle 6.3: Materialkennwerte der untersuchten Sedimente (Esser, 2011).

| Probe | Wassergehalt (%) | Feuchtdichte (g/cm^3) | Trockendichte (g/cm^3) | Lagerungsdichte (%) | Dyn. Verformungsmodul (MN/m^2) |
|---------------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---|
| Sand Hypocauste locker | 19.55 | - | - | - | 14.1 |
| Sand Hypocauste ungestört | 1.80 | 1.47 | 1.44 | 59.0 | - |
| Sand Kloake ungestört | 11.45 | 1.66 | 1.49 | 70.0 | - |

Neben dem niedrigen Wert des Verformungsmoduls (s.o.) fällt der hohe Wassergehalt der Proben an der Hypocauste (gestörte Lagerung) und der Probe an der Kloake (ungestörte Lagerung) auf. Diese Proben stammen beide aus den bimsführenden Schichten, so dass, je nachdem ob eine Bimslage beprobt wurde oder nicht, der Wassergehalt variieren kann. Bims hat die Eigenschaft bei der Verwitterung Tonminerale zu bilden, welche Wasser in den großen Porenräumen binden können. In weiteren Untersuchungen wurde für Proben aus den Rammkernsondierungen der Karbonatgehalt bestimmt. Hierbei fällt auf, dass besonders die an der Oberfläche anstehenden Schichten hohe Kalkgehalte (bis zu 23 %Vol) aufweisen. Hierbei ist unklar, ob dies durch aufgearbeitete Lössbeimengungen aus der Niederterrasse auf natürlichem Wege oder durch Eintrag aus den darüber liegenden anthropogenen Schichten mit Kalkestrichen und –mörteln, zu erklären ist.

Auf Grundlage der gewonnenen Materialkennwerte wurde in der Arbeit von Esser (2011) die Möglichkeit der Bodenverflüssigung nach KTA 2201.2 („Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen Teil 2: Baugrund“) für die beprobten Sande durchgeführt. In Abb. 6.11 sind die Korngrößenverteilungskurven der Probe vor der Hypocauste sowie den Sandproben an der Kloake unter Berücksichtigung der nach KTA 2201.2 verflüssigungsgefährdeten Zonen 1 und 2 aufgetragen. Es zeigt sich, dass alle Proben aus dem Bereich des Rathausplatzes hauptanteilig in Zone 2 liegen. Die Zonenklassifikation der Korngrößenverteilung dient der Zuweisung einer Grenzwertlinie beim Verhältnis des dynamischen Schubspannungs-Verhältnisses zur Lagerungsdichte (Abb. 6.16).

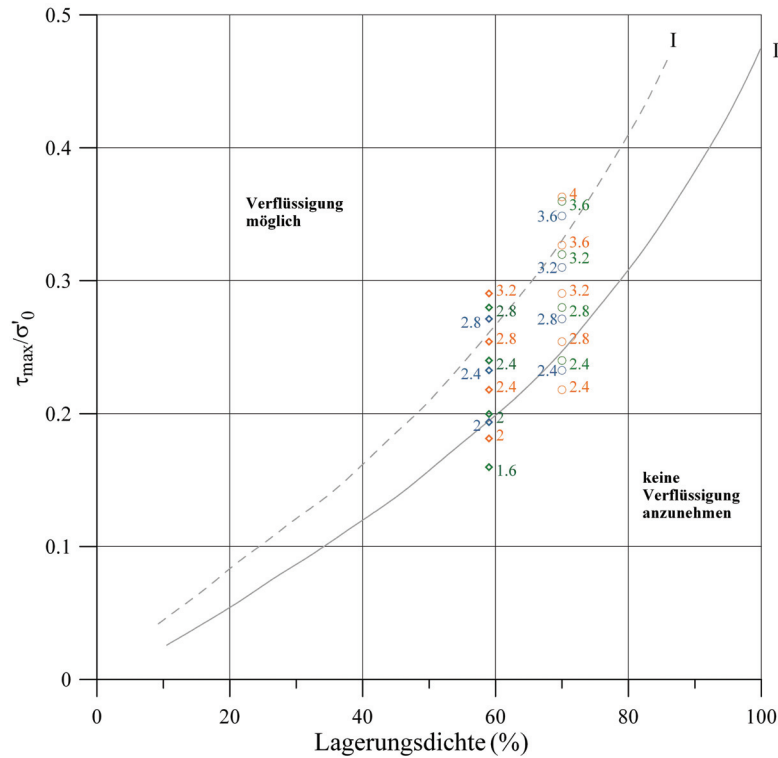


Abbildung 6.16: Grenzwerte des dynamischen Schubspannungsverhältnisses gegen die Lagerungsdichte. Eingezeichnet sind die Grenzlinien für die Korngrößenzonen I und II (nach KTA 2201.2). Die Ergebnisse für die Proben der Hypocauste (Rauten) und für die Proben der Kloake (Kreise) sind jeweils für Tiefenlagen von 1 m (grün), 5 m (blau) und 10 m (orange) aufgetragen. Die Zahlen geben die maximale Bodenbeschleunigung in m/s^2 an, die bei der jeweiligen Berechnung verwendet wurde (modifiziert nach Esser, 2011).

Die Berechnungen des dynamischen Schubspannungsverhältnisses τ_{max}/σ'_0 wurden für die Proben an der Hypocauste und der Kloake jeweils für Tiefenlagen von 1 m, 5 m und 10 m mit Beschleunigungen zwischen 0.4 m/s^2 und 10 m/s^2 durchgeführt. Hierbei wurden zunächst die maximalen Schubspannungen nach KTA 2201.2 berechnet:

$$\tau_{max} = \sigma_0 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d \quad (6.1)$$

σ_0 ist hierbei die totale vertikale Spannung in einer bestimmten Tiefe, a_{max} die maximale Bodenbeschleunigung, g die Erdbeschleunigung und r_d der tiefenabhängige Reduktionsfaktor. Das dynamische Schubspannungsverhältnis wird über das Verhältnis der maximalen Schubspannung τ_{max} zu der wirksamen vertikalen Spannung σ'_0 in einer bestimmten Tiefe berechnet. Hierbei wurde die vereinfachte Annahme getroffen, dass die totale vertikale Spannung σ_0 , also die Spannung aus Bauwerkslast und dem Gewicht des wassergesättigten

Bodens bei höchstem Grundwasserstand, gleich der wirksamen vertikalen Spannung σ'_0 , also der Spannung aus Bauwerkslast und Gewicht des Bodens nach Abzug des Auftriebs ist:

$$\sigma'_0 = \sigma_0 \quad (6.2)$$

Es zeigt sich, dass bei der Zuordnung der Proben zu Zone 2 nach KTA 2201.2 Beschleunigungen von 2.0-2.4 m/s² im Fall der Hypocauste und von 2.8 m/s² im Fall der Kloake ausreichen, um Bodenverflüssigung zu ermöglichen. Tabelle 6.4 fasst die Ergebnisse nach Esser (2011) für die beiden Lokalitäten in verschiedenen Tiefenlagen zusammen.

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Untersuchung des Verflüssigungspotentials für die Sande an der Hypocauste (H) und der Kloake (K) für verschiedene Tiefenlagen und Beschleunigungen, bei denen die Grenzwerte des dynamischen Schubspannungsverhältnisses für die Zonen 1 (Z1) und 2 (Z2) nach KTA 2201.2 überschritten wurden. Die Lagerungsdichte lag an der Kloake bei 70% und an der Hypocauste bei 59% (nach Esser, 2011).

| Ort | Tiefe (m) | Grenzwert von τ_{\max}/σ_0 | Beschleunigung a_{\max} (m/s ²) | Reduktionsfaktor Γ_d | Vert. Spannung σ_0 (kN/m ³) | Schubspannung τ_{\max} (kN/m ²) | Dyn. Schubspannungsverhältnis τ_{\max}/σ_0 |
|-----|-----------|--------------------------------------|---|-----------------------------|--|--|--|
| H | 1 | Z1 (0.261) | 2.80 | 0.98 | 9.5 | 2.66 | 0.28 |
| H | 5 | Z1 (0.261) | 2.80 | 0.95 | 47.5 | 12.88 | 0.27 |
| H | 10 | Z1 (0.261) | 3.20 | 0.89 | 95 | 27.58 | 0.29 |
| H | 1 | Z2 (0.195) | 2.00 | 0.98 | 9.5 | 1.90 | 0.20 |
| H | 5 | Z2 (0.195) | 2.40 | 0.95 | 47.5 | 11.04 | 0.23 |
| H | 10 | Z2 (0.195) | 2.40 | 0.89 | 95 | 20.67 | 0.22 |
| K | 1 | Z1 (0.329) | 3.60 | 0.98 | 9.5 | 3.42 | 0.36 |
| K | 5 | Z1 (0.329) | 3.60 | 0.95 | 47.5 | 16.56 | 0.35 |
| K | 10 | Z1 (0.329) | 4.00 | 0.89 | 95 | 34.48 | 0.36 |
| K | 1 | Z2 (0.247) | 2.80 | 0.98 | 9.5 | 2.66 | 0.28 |
| K | 5 | Z2 (0.247) | 2.80 | 0.95 | 47.5 | 12.88 | 0.27 |
| K | 10 | Z2 (0.247) | 2.80 | 0.89 | 95 | 24.13 | 0.25 |

Um tatsächlich Bodenverflüssigung durch seismische Belastung zu erzeugen muss neben der Wassersättigung eine kritische Bodenbeschleunigung erreicht bzw. überschritten werden. Abbildung 6.17 zeigt den Zusammenhang mit der Epizentralentfernung.

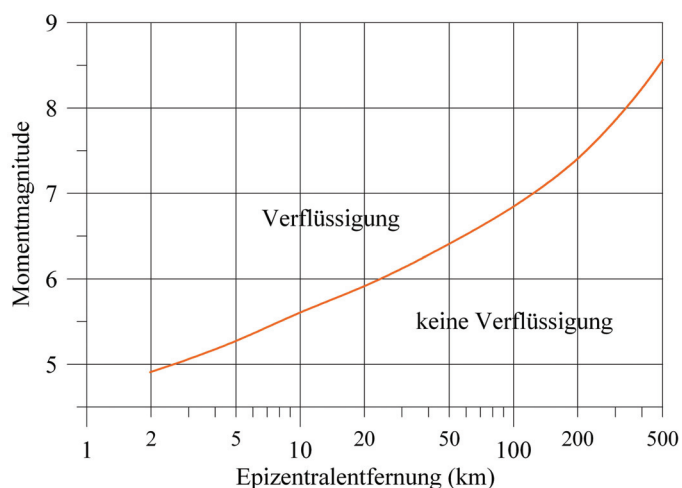


Abbildung 6.17: Epizentralentfernungen bis zu denen Bodenverflüssigung beobachtet wurde in Abhängigkeit der Momentmagnitude für Beben mit Herdtiefen <50 km (nach Ambraseys, 1988).

Neben den Befunden auf dem zentralen Rathausplatz wurde der gewachsene Boden auch im südlichen Platzbereich, während der archäologischen Ausgrabungen, gefunden. Der gewachsene Boden wurde im Haus Nichols (Abb. 6.18, 1) und im Haus Bardowick des mittelalterlichen jüdischen Viertels (siehe Kapitel 5.3) sowie im Eingangsbereich der Mikwe (Abb. 6.18, 2) nachgewiesen.

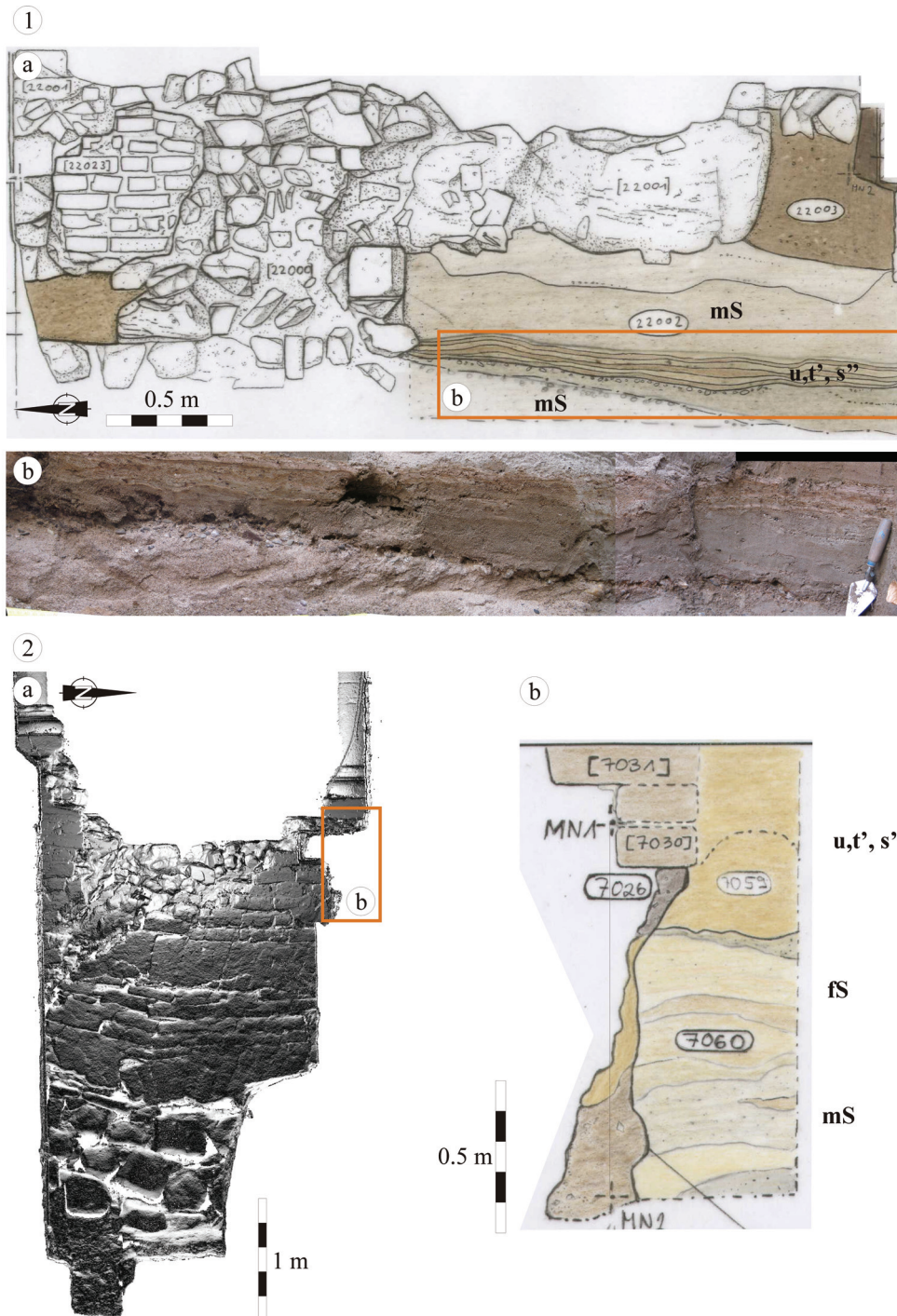


Abbildung 6.18: Aufschlüsse des gewachsenen Bodens auf dem südlichen Rathausplatz im Haus Nichols (1) und im Eingangsbereich der Mikwe (2). (1a) zeigt eine archäologische Profilzeichnung des Aufschlusses in dem Mittelsand mit sandigen Ton-Schluffbändern ansteht. (b) Panoramafoto des in (1a) markierten Bereiches. (2a) Aus der 3D-Punktwolke extrahiertes Orthophoto der westlichen Wand in der Grube im Eingangsbereich der Mikwe. (2b) zeigt den in (2a) markierten Bereich als archäologische Profilzeichnung. Hier steht ein gebänderter Sand unter einem Lehmpaket an (Zeichnungen: Archäologische Zone Köln, 2010).

Die Höhenlagen wurden aus dem georeferenzierten 3D Modell der Laserscans bzw. aus den georeferenzierten archäologischen Zeichnungen extrahiert (Abb. 6.6). An den genannten Lokalitäten wurden keine geotechnischen Untersuchungen durchgeführt, da die Fundpunkte nicht mit schwerem Gerät zugänglich waren. Bei der Begutachtung des Materials im Feld zeigte sich jedoch, dass zumindest die anstehenden Sande große Ähnlichkeiten in Bezug auf Korngröße und Kohäsion zu den Proben vom nördlichen Rathausplatz zeigten.

Die Ergebnisse der Feldarbeiten zur Zusammensetzung des gewachsenen Bodens, die ermittelten Materialparametern sowie die Lage der Fundpunkte des gewachsenen Bodens wurden genutzt, um auf Grundlage des Modells von Wiosna (2010) ein erweitertes Untergrundmodell des Arbeitsgebietes mit dem Rheinhang zu erstellen (Abb. 6.19).

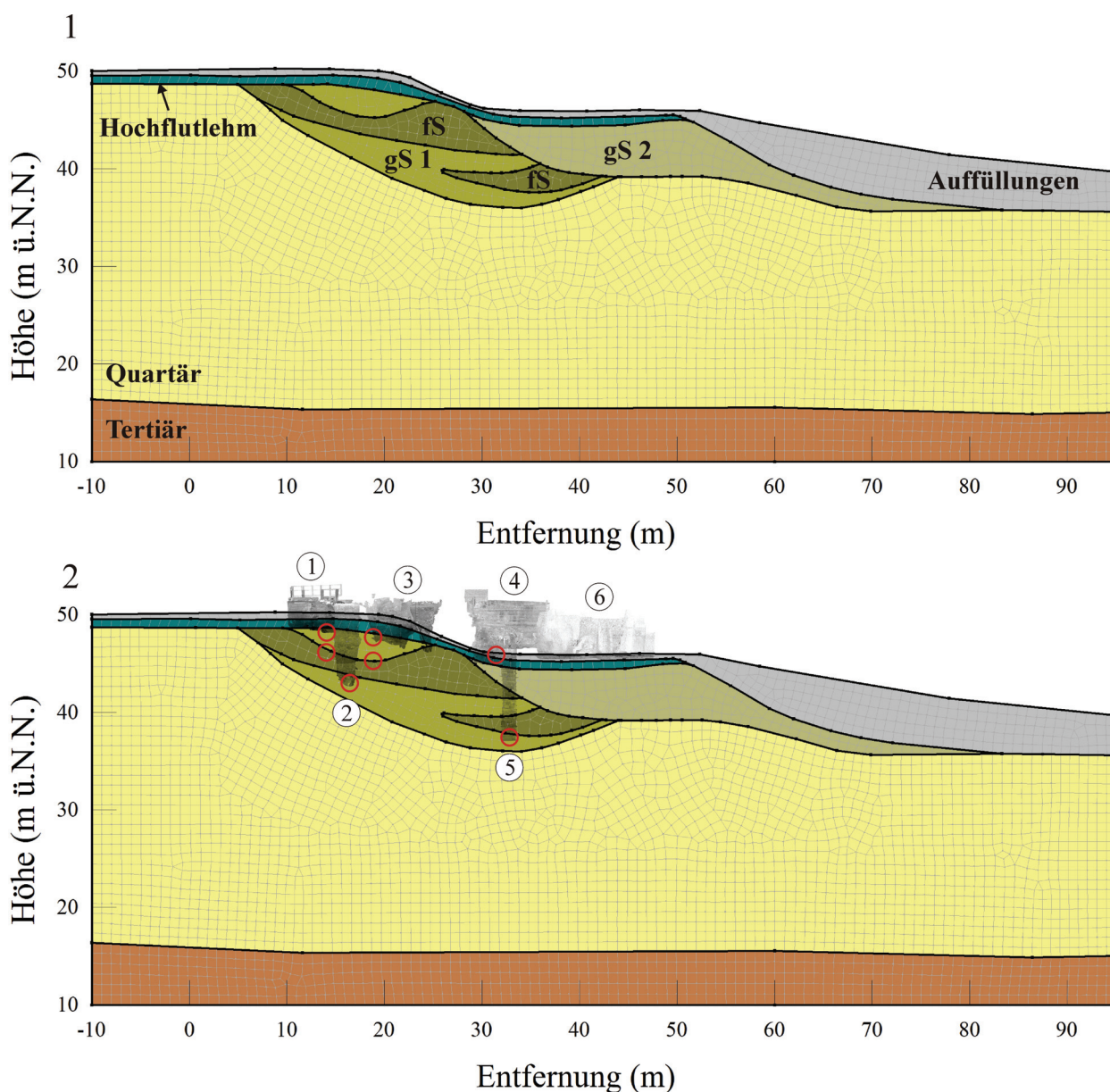


Abbildung 6.19: Erweitertes Modell des Untergrundes des Arbeitsgebietes mit dem Rheinhang (1). (2) zeigt das erweiterte Untergrundmodell in Kombination mit den georeferenzierten 3D Laserscandaten. Die roten Kreise markieren nachgewiesene Punkte des gewachsenen Bodens. (1) Hypocauste, (2) Kloake, (3) Profil an der Kloake, (4) Apsis, (5) Römischer Brunnen, (6) Porticus Areal.

Hierzu wurde das quartäre Material des vereinfachten Modells durch die in den Felduntersuchungen nachgewiesenen Einheiten aus Feinsand, Grobsand und den tonig-schluffigen Ablagerungen des Hochflutlehms, ergänzt. Tabelle 6.5 zeigt die wichtigsten Materialparameter, die den Einheiten im erweiterten Modell zugewiesen wurden.

Tabelle 6.5: Materialparameter der im erweiterten Modell verwendeten Einheiten.

| Einheit | Spezifisches Gewicht (kN/m³) | Poissonzahl | Kohäsion (kPa) | Winkel der inneren Reibung (°) |
|----------------|--|--------------------|---------------------------|---|
| Auffüllung | 17.00 | 0.21 | 0 | 27.0 |
| Hochflutlehm | 18.00 | 0.23 | 20 | 25.0 |
| Feinsand | 14.50 | 0.33 | 0 | 32.0 |
| Grobsand 1 | 19.00 | 0.25 | 0 | 33.0 |
| Grobsand 2 | 19.00 | 0.25 | 0 | 33.5 |
| Quartär | 20.50 | 0.21 | 0 | 36.0 |
| Tertiär | 19.00 | 0.21 | 0 | 35.0 |

6.2 Ingenieurseismologisches Modell

Neben der Zusammensetzung des lokalen Untergrundes wird durch den standortspezifischen Ansatz des in Kapitel 2.0 vorgestellten Arbeitsschemas, auch die regionale geologische und seismotektonische Situation in die Simulation der Schadensursache miteinbezogen.

Auf Grundlage eines Modells von Hinzen (2005b) wurde zunächst ein Modell der aktiven Verwerfungen in der Niederrheinischen Bucht erstellt (Wegner, 2010). Hinzu kommt ein regionales Geschwindigkeitsmodell für den Untergrund der Niederrheinischen Bucht (Reamer und Hinzen, 2004). Durch die Kombination beider Modelle konnten mithilfe des Programms QSGRN (Wang, 2008) die Green'schen Funktionen des erstellten Untergrundmodells berechnet werden. Mit dem Programm QSCMP (Wang, 2008) wurden daraus synthetische Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Verschiebungs-Seismogramme für einen Standort im Arbeitsgebiet auf dem Rathausplatz berechnet. Der Berechnung liegt hierbei das modifizierte Kostrov-Modell des ausgedehnten seismischen Herds zugrunde. Demnach beginnt bei einem Erdbeben der Bruch auf der Herdfläche im Hypozentrum und breitet sich radial mit konstanter Geschwindigkeit bis zu einem festgelegten Radius aus (Madariaga, 2009). Bei der Berechnung der Bodenbewegungen wird die Herdfläche in Teilflächen zerlegt, deren Größe zufällig zwischen vorgegebenen Grenzwerten verteilt wird und deren seismische Momente sich zum seismischen Moment der Gesamtfläche aufsummieren. Für jede dieser Teilflächen wird die resultierende Bodenbewegung berechnet und auf Grundlage der jeweiligen Lage zum Hypozentrum, zeitlich versetzt zu einer Gesamtbewegung addiert (Hutchings, 1991).

6.2.1 Seismotektonisches Modell

Mit der Öffnung des Nordatlantiks im Eozän veränderte sich das vorherrschende Spannungsfeld im Gebiet der Niederrheinischen Bucht. Die Hauptkompressionsrichtung war, seit dem Ende der Kreidezeit NNE-SSW ausgerichtet. Die tektonischen Vorgänge seit dem Eozän verursachten Richtungsänderungen bei der Kollision der afrikanischen und der europäischen Platte, so dass die Hauptkompressionsrichtung gegen den Uhrzeigersinn auf NW-SE verschoben wurde (Dewey et al., 1973; Ahorner, 1975). Begleitet wurde diese Richtungsänderung von einer Zunahme der seismischen Aktivität in der Niederrheinischen Bucht bzw. im gesamten europäischen Riftsystem, welches sich vom Tal der Rhône im Süden, über der Oberrheingraben, die Niederrheinische Bucht bis zum Nordseegraben erstreckt (Ziegler, 1992). Der tektonische Aufbau der Niederrheinischen Bucht ist, bedingt durch die Hauptkompressionsrichtung, ebenfalls NW-SE ausgerichtet (Abb. 6.20). Das Gebiet kann in einen nördlichen und einen südlichen Bereich aufgeteilt werden, in denen jeweils verschiedene Schollen durch NW-SE streichende Störungen getrennt werden.

Der südliche Bereich wird von West nach Ost in die Rur-Scholle, die Erft-Scholle und die Kölner Scholle unterteilt (Abb. 6.20). Die Rur-Scholle wird hierbei im Westen von Staffelbrüchen vom Rheinischen Schiefergebirge bzw. der Limburger Kreidetafel getrennt. Die wichtigsten Verwerfungen dieser Übergangszone sind von West nach Ost die Heerler-Störung, die Feldbiß-Störung und die Sandgewand-Störung. Nach Süden ist die Rur-Scholle ebenfalls durch Staffelbrüche vom Schiefergebirge getrennt. Im Osten bildet das Rurand-Störungssystem die Grenze der südlichen Rur-Scholle zur Erft-Scholle. Diese wird wiederum nach Osten über das Erft-Sprung-System und das Swift-Sprung-System von der Kölner

Scholle getrennt. Im südlichen Bereich ist hier die Ville, eine Teilscholle der Kölner-Scholle, eingeschoben (Walter, 1995). Nach Süden taucht die Erft-Scholle meist bruchlos unter das Grundgebirge. Die Kölner Scholle wird im Osten von den südlichen Ausläufern des Viersener-Sprunges, des Kalker-Sprunges sowie dem Rodenkirchener-Sprung vom Grundgebirge getrennt.

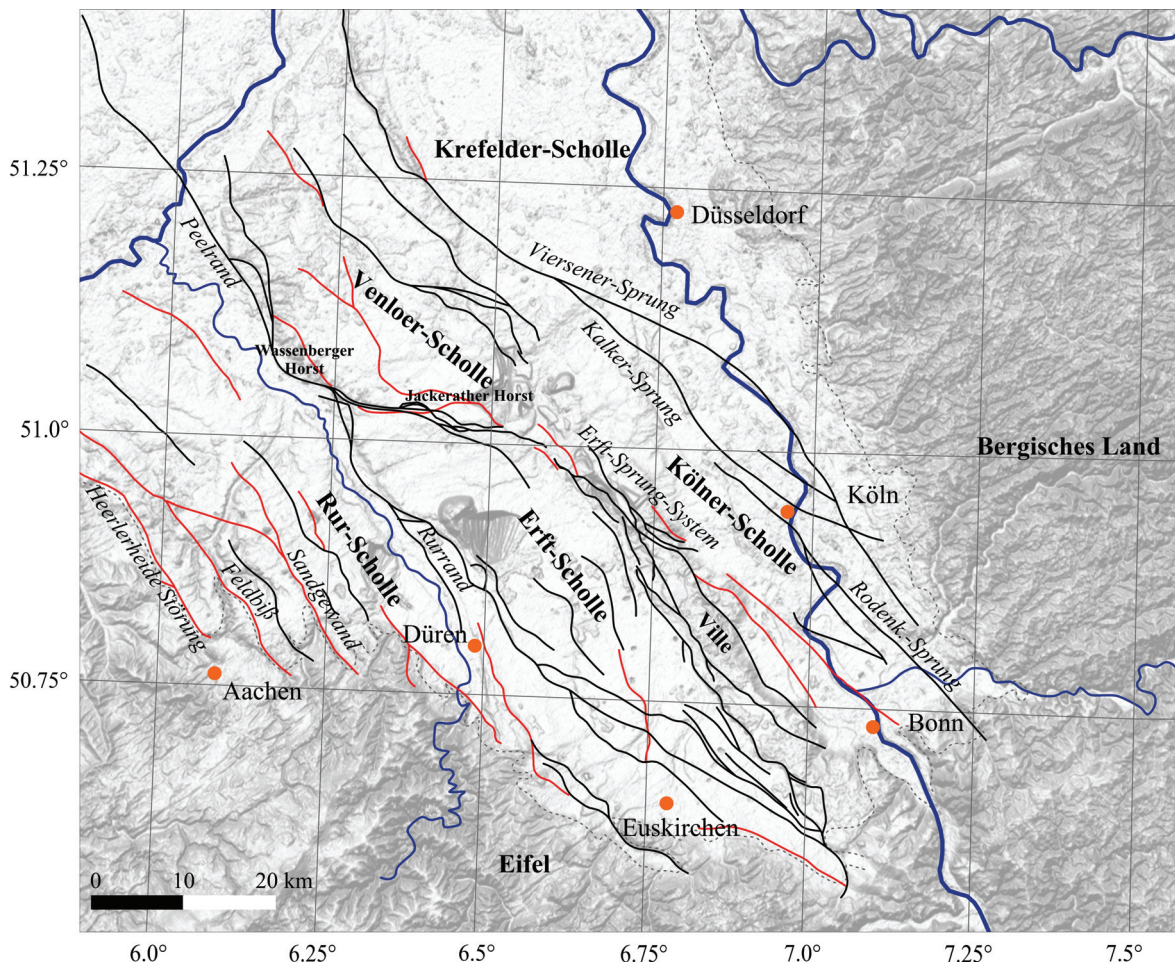


Abbildung 6.20: Tektonische Karte der Niederrheinischen Bucht (rot: Einfallrichtung E, schwarz: Einfallrichtung W)(modifiziert nach Hinzen und Reamer, 2007; Weber, 2007)

Die Trennung des südlichen und des nördlichen Teils der Niederrheinischen Bucht erfolgt durch den Wassenberger Horst und der Jackerather Horst.

Im nördlichen Abschnitt findet im Westen die Rur-Scholle im Niederländischen Zentralgraben ihre Fortsetzung. Östlich davon schließen sich die Venloer-Scholle und die Krefelder-Scholle an (Walter, 1995). Im Osten des Niederländischen Zentralgrabens bildet die Peelrand-Störung die Grenze zur Venloer-Scholle. Diese wird durch den Viersener-Sprung von der Krefelder-Scholle im Osten der Niederrheinischen Bucht getrennt.

Die tektonische Aktivität der Niederrheinischen Bucht wird durch die Seismizität der Region (vgl. Kap. 3.0 Seismizität) sowie durch rezente Senkungsbewegungen belegt. Am Erft-Sprung-System können durch Feinnivellements Versatzbeträge von 0.9 mm/a nachgewiesen werden (Ahorne, 2001). Hinzen (2005b) hat auf dieser Grundlage ein seismotektonisches Modell der Niederrheinischen Bucht erstellt. In der Arbeit von Wegner (2010) wurde dieses Modell überarbeitet und 16 Hauptstörungen ausgewählt, die als mögliche Quellen für

Erdbeben in der Niederrheinischen Bucht in Frage kommen (Abb. 6.21). Die geometrischen Eckdaten dieser Störungen können Tabelle 6.6a und 6.6b entnommen werden.

Tabelle 6.6a: Geometrische Parameter der Störungssegmente S01-S08 des seismotektonischen Modells. (NEP/SEP: Nördlicher/ Südlicher Eckpunkt, AZK: Archäologische Zone Köln)(teilw. nach Wegner 2010).

| Störung | Beschreibung | Streichen (°) | Einfallen (°) | Rake (°) | Länge (km) | Oberflächenentf. NEP-AZK (km) | Oberflächenentf. SEP-AZK (km) |
|---------|-------------------------|------------------|------------------|-------------|---------------|----------------------------------|----------------------------------|
| S01 | Viersener Sprung System | 115.2 | 80 | -90 | 31.9 | 42.7 | 15.4 |
| S02 | Viersener Sprung System | 144.9 | 80 | -90 | 34.2 | 17.4 | 18.0 |
| S03 | Kalker Sprung | 130.9 | 80 | -90 | 36.2 | 30.5 | 6.5 |
| S04 | Rodenkirchener Sprung | 135.9 | 80 | -90 | 40.9 | 9.0 | 32.1 |
| S05 | Viersener Sprung System | 150.0 | 80 | -90 | 24.0 | 71.7 | 48.8 |
| S06 | Wesselingener Sprung | 130.4 | 80 | -90 | 25.4 | 9.3 | 25.9 |
| S07 | Erft-Sprung-System | 138.3 | 80 | -90 | 46.9 | 28.6 | 25.6 |
| S08 | Erft-Sprung-System | 145.2 | 80 | -90 | 40.4 | 17.1 | 39.8 |

Tabelle 6.6b: Geometrische Parameter der Störungssegmente S09-S16 des seismotektonischen Modells (teilw. nach Wegner 2010).

| Störung | Beschreibung | Streichen (°) | Einfallen (°) | Rake (°) | Länge (km) | Oberflächenentf. NEP-AZK (km) | Oberflächenentf. SEP-AZK (km) |
|---------|----------------------|------------------|------------------|-------------|---------------|----------------------------------|----------------------------------|
| S09 | Erft-Sprung-System | 102.7 | 80 | -90 | 25.3 | 52.2 | 27.0 |
| S10 | Peelrand | 150.6 | 60 | -90 | 44.4 | 93.6 | 56.8 |
| S11 | Rur-Sprung | 149.2 | 80 | -90 | 30.5 | 52.8 | 36.6 |
| S12 | Stockheimer-Sprung | 152.0 | 80 | -90 | 21.3 | 35.8 | 38.6 |
| S13 | Kirspenicher Sprung | 129.8 | 80 | -90 | 22.3 | 37.2 | 40.5 |
| S14 | Sangeward | 149.0 | 80 | -90 | 26.8 | 60.4 | 49.3 |
| S15 | Feldbiß | 133.5 | 80 | -90 | 33.6 | 93.4 | 67.5 |
| S16 | Heerlerheide-Störung | 142.4 | 80 | -90 | 54.6 | 101.1 | 64.2 |

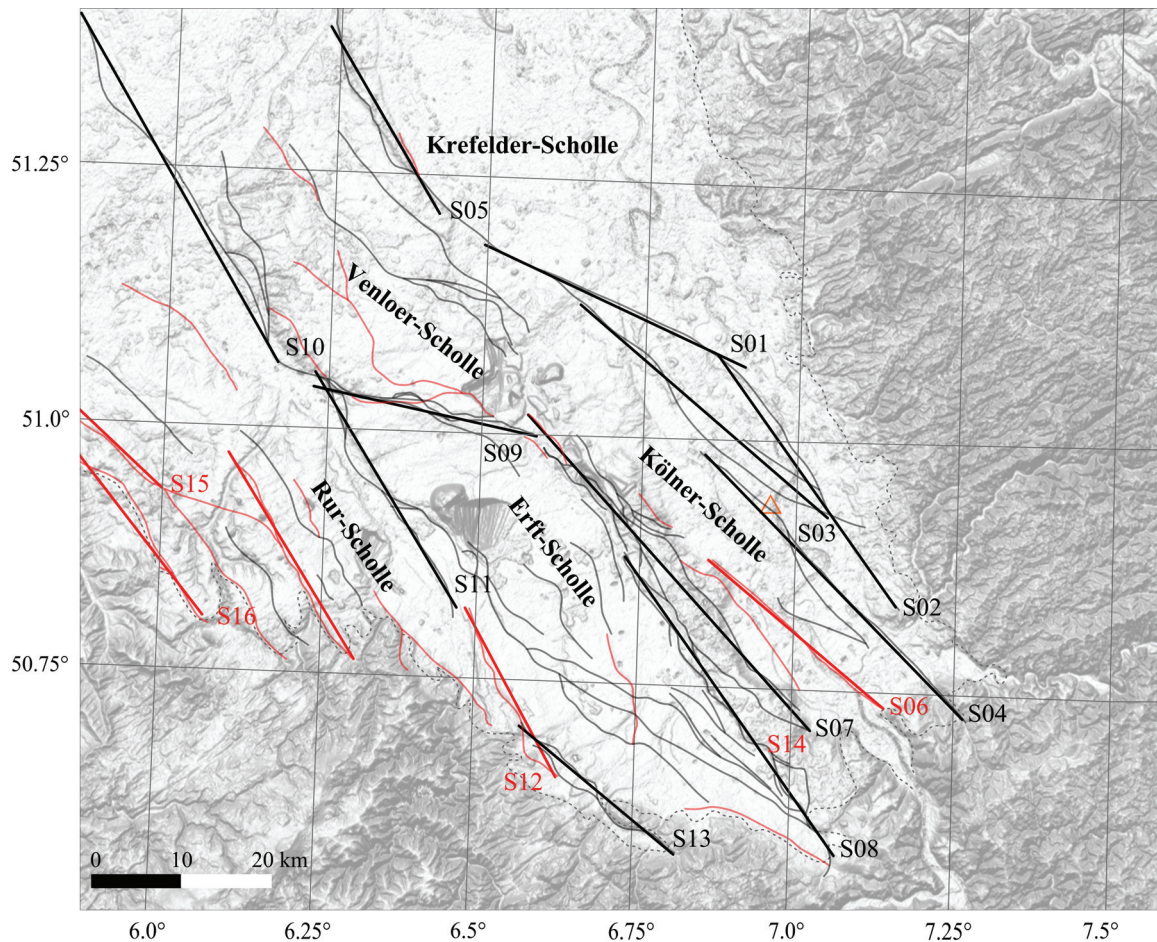


Abbildung 6.21: Modell von 16 Verwerfungssegmenten (S01-S16) in der Niederrheinischen Bucht (rot: Einfallrichtung E, schwarz: Einfallrichtung W). Das Dreieck markiert die Lage der Archäologischen Zone (nach Hinzen, 2005b; Wegner, 2010).

GESCHWINDIGKEITSMODELL

Um über die Green'schen Funktionen synthetische Seismogramme für die Archäologische Zone in der Kölner Altstadt berechnen zu können, ist ein eindimensionales Modell der Geschwindigkeitsverteilung der Niederrheinischen Bucht nötig. In der Arbeit von Wegner (2010) wurde ein kombiniertes Modell aus dem Geschwindigkeitsmodell der Erdbebenstation Bensberg und dem PREM („Preliminary Reference Earth Model“) genutzt. Das Geschwindigkeitsmodell der Erdbebenstation Bensberg (Reamer und Hinzen, 2004) basiert auf der Auswertung von 496 Erdbeben und liefert die P-Wellengeschwindigkeiten für die oberen 30 km des Untergrundes. Für die Berechnung der synthetischen Seismogramme wurde ein Modell bis zur Grenze zum unteren Erdmantel in ca. 670 km Tiefe genutzt. Die Geschwindigkeiten unterhalb des Bensberger Modells wurden aus dem PREM (Dziewonski und Anderson, 1981) übernommen. Das PREM basiert auf Daten von langperiodischen Oberflächenwellen aus den Jahren 1969-1980 und Laufzeiten von Raumwellen aus den Jahren 1964-1975. Abbildung 6.22 zeigt das für die Berechnungen verwendete Geschwindigkeitsmodell nach Wegner (2010).

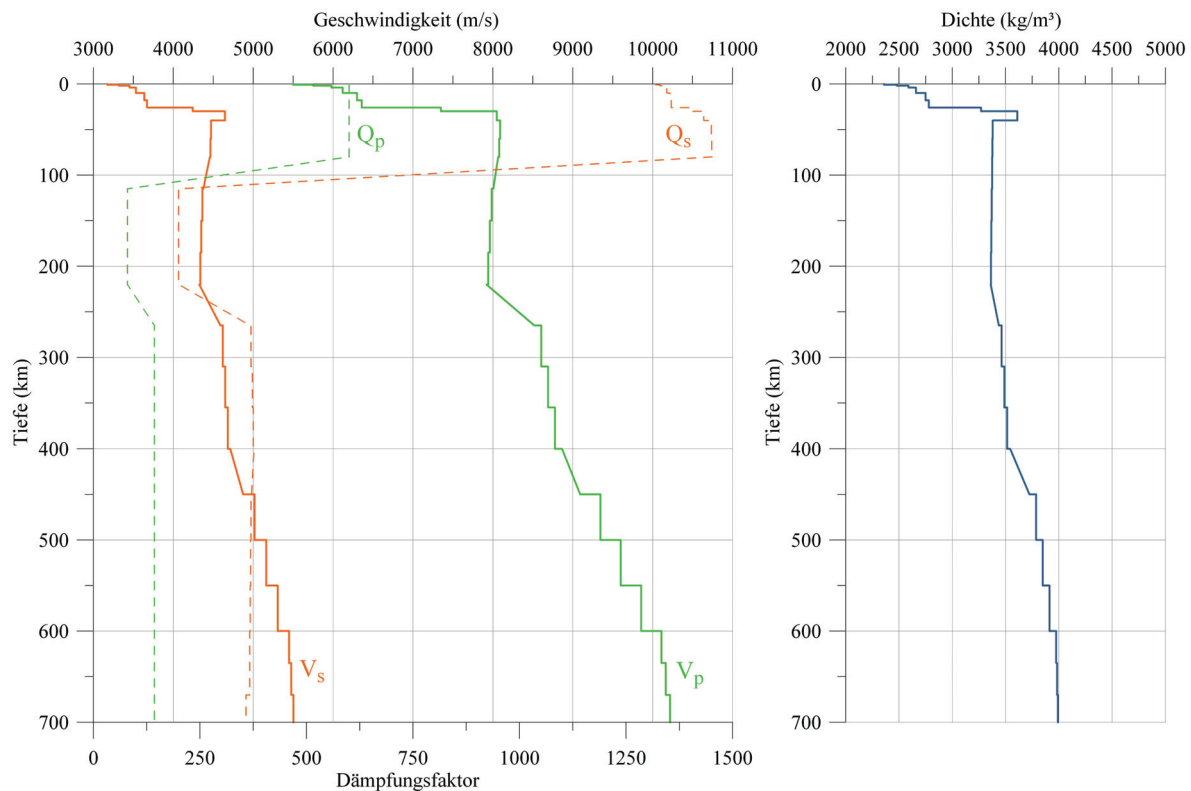


Abbildung 6.22: Kombiniertes Geschwindigkeitsmodell für die Berechnung der synthetischen Seismogramme. Die grüne Linie zeigt die P-Wellengeschwindigkeiten, die orange Linie die S-Wellengeschwindigkeiten. Die gestrichelten Linien geben die zugehörigen Q-Werte. Auf der rechten Seite ist die Dichte des Materials für die jeweiligen Tiefen aufgetragen (0-30 km: Reamer und Hinzen, 2004; 30-670 km: Dziewonski und Anderson, 1981).

SYNTHETISCHE SEISMOGRAMME

Auf Grundlage des Modells der aktiven Verwerfungen in der Niederrheinischen Bucht und des Geschwindigkeitsmodells, wurden mittels der Programme QSGRN und QSCMP (Wang, 2008) synthetische Seismogramme für die stärksten anzunehmenden Ereignisse an den ausgewählten Störungssegmenten berechnet (unveröffentlicht, Hinzen 2011). Eine detaillierte Beschreibung des Berechnungsvorganges kann der Arbeit von Wegner (2010) entnommen werden. Als Standort für den Aufzeichnungspunkt der Seismogramme wurde ein Punkt westlich des Praetorius (GK: RW 2567357.39, HW 5645336.33) gewählt (Wegner, 2010). Die Seismogramme wurden als Eingangssignal für die ingenieurseismologischen Berechnungen mit den vorgestellten Modellen verwendet. Als Eingangssignal für das 2D-Modell des Rheinhanges wurden nur die EW- und die Vertikal-Komponente der berechneten Seismogramme verwendet. Tabelle 6.7 fasst die wichtigsten Parameter der Ost-West- und der Vertikal-Komponenten, der berechneten Seismogramme für die Erdbeben an den ausgewählten Störungen, zusammen.

Tabelle 6.7: Kennwerte der EW- und Vertikal-Komponenten der synthetischen Seismogramme. Angegeben sind die Intensität nach der modifizierten Mercalli Skala (MMI), die Arias Intensität (I_a), die Momentmagnitude (M_w), sowie die maximale Bodenbeschleunigung (a_{\max}), die maximale Geschwindigkeit (v_{\max}) und die maximale Verschiebung (u_{\max}) (nach Hinzen, unveröffentlicht, 2011).

| Störungs-segment | Komponente | MMI | I_a (m/s) | M_w | a_{\max} (m/s ²) | v_{\max} (m/s) | u_{\max} (m) |
|------------------|------------|------|-------------|-------|--------------------------------|------------------|----------------|
| S 01 | EW | VIII | 0.466 | 6.62 | 1.958 | 0.066 | 0.041 |
| S 01 | vertikal | IX | 0.316 | | 1.630 | 0.070 | 0.063 |
| S 02 | EW | X | 5.628 | 6.66 | 5.906 | 0.213 | 0.230 |
| S 02 | vertikal | X | 2.049 | | 3.995 | 0.172 | 0.493 |
| S 03 | EW | XI | 7.893 | 6.70 | 7.839 | 0.281 | 0.100 |
| S 03 | vertikal | X | 0.964 | | 2.911 | 0.156 | 0.430 |
| S 04 | EW | XI | 15.216 | 6.78 | 11.596 | 0.407 | 0.094 |
| S 04 | vertikal | XI | 2.439 | | 4.989 | 0.177 | 0.174 |
| S 05 | EW | IV | 0.008 | 6.83 | 0.195 | 0.011 | 0.006 |
| S 05 | vertikal | VII | 0.008 | | 0.291 | 0.013 | 0.010 |
| S 06 | EW | IX | 0.948 | 6.47 | 2.630 | 0.129 | 0.040 |
| S 06 | vertikal | X | 1.283 | | 2.821 | 0.156 | 0.198 |
| S 07 | EW | VIII | 1.144 | 6.87 | 2.233 | 0.095 | 0.255 |
| S 07 | vertikal | X | 1.057 | | 2.294 | 0.086 | 0.146 |
| S 08 | EW | VIII | 0.584 | 6.77 | 1.772 | 0.078 | 0.119 |
| S 08 | vertikal | IX | 0.541 | | 1.797 | 0.075 | 0.087 |
| S 09 | EW | V | 0.008 | 6.47 | 0.257 | 0.014 | 0.005 |
| S 09 | vertikal | VI | 0.004 | | 0.145 | 0.010 | 0.004 |
| S 10 | EW | V | 0.023 | 6.83 | 0.284 | 0.021 | 0.021 |
| S 10 | vertikal | VII | 0.052 | | 0.440 | 0.023 | 0.009 |
| S 11 | EW | VI | 0.052 | 6.59 | 0.542 | 0.033 | 0.063 |
| S 11 | vertikal | VIII | 0.097 | | 0.649 | 0.043 | 0.029 |
| S 12 | EW | VI | 0.048 | 6.36 | 0.576 | 0.032 | 0.034 |
| S 12 | vertikal | IX | 0.191 | | 1.391 | 0.052 | 0.041 |
| S 13 | EW | VI | 0.038 | 6.39 | 0.496 | 0.033 | 0.036 |
| S 13 | vertikal | VIII | 0.095 | | 0.883 | 0.049 | 0.030 |
| S 14 | EW | V | 0.023 | 6.51 | 0.386 | 0.024 | 0.025 |
| S 14 | vertikal | VIII | 0.082 | | 0.682 | 0.040 | 0.029 |
| S 15 | EW | IV | 0.007 | 6.61 | 0.199 | 0.017 | 0.012 |
| S 15 | vertikal | VII | 0.019 | | 0.353 | 0.026 | 0.020 |
| S 16 | EW | V | 0.033 | 6.97 | 0.316 | 0.021 | 0.018 |
| S 16 | vertikal | VIII | 0.098 | | 0.795 | 0.034 | 0.021 |

6.2.2 Modellierung von Schadensszenarien

In Kapitel 6.1 und Abschnitt 6.2.1 wurden die Modelle des Arbeitsgebietes vorgestellt, die zur Prüfung der Plausibilität von Schadensursachen verwendet wurden. Der komplexe Aufbau des Untergrundes konnte nicht komplett auf ein numerisches Modell übertragen werden. Bei der Modellerstellung mussten daher starke Vereinfachungen der Situation im Arbeitsgebiet vorgenommen werden. Der Aufbau des Baugrundes, die topographische Lage und die seismotektonischen Situation konnten Randbedingungen für die Modelle definieren bzw. die Berechnungsgrundlagen schaffen. Die beobachteten Schäden an Gebäuden sind in dieser Studie ein Indikator für Bewegungen des Baugrundes dieser Gebäude. Alle hier vorgestellten Modellrechnungen dienen daher in erster Linie der Überprüfung der Plausibilität eines Szenarios.

Neben dem Verhalten des Modells unter seismischer Belastung wurde zuvor die statische Standsicherheit des Modells untersucht. Alternativ zur Belastung durch Erdbeben, wurden auch Niederschlagsereignisse berücksichtigt. Abflaufendes Wasser in einem nicht kontrolliert drainierten System, kann speziell im Hinblick auf das in Köln anstehende Material (Busch und Luckner, 1974) Oberflächenerosion, aber auch Erosion im Untergrund (z.B. Tunnelerosion, Auswaschung) zur Folge haben (u.a. Jones, 2004a; Owoputi und Stolte, 2001).

STATISCHE STANDSICHERHEIT

Zur Untersuchung der statischen Standsicherheit des erweiterten Modells des Rheinhanges wurde mit dem Programm SLOPE/W (Geostudio 2007) eine Berechnung auf Grundlage des so genannten Lamellenverfahrens durchgeführt. Hierbei werden kreisförmige Gleitflächen für einen zuvor definierten Bereich im Modell berechnet. Im Untergrundmodell des Arbeitsgebietes wurde im Schwerpunkt der Hang zu einem ehemaligen Seitenarm des Rheins auf seine Standsicherheit untersucht. Der Bereich des Modells der über jeweils einer der Gleitflächen liegt ist die potentielle Rutschmasse, die bei einem Versagen des Hanges mobilisiert wird (Abb. 6.23).

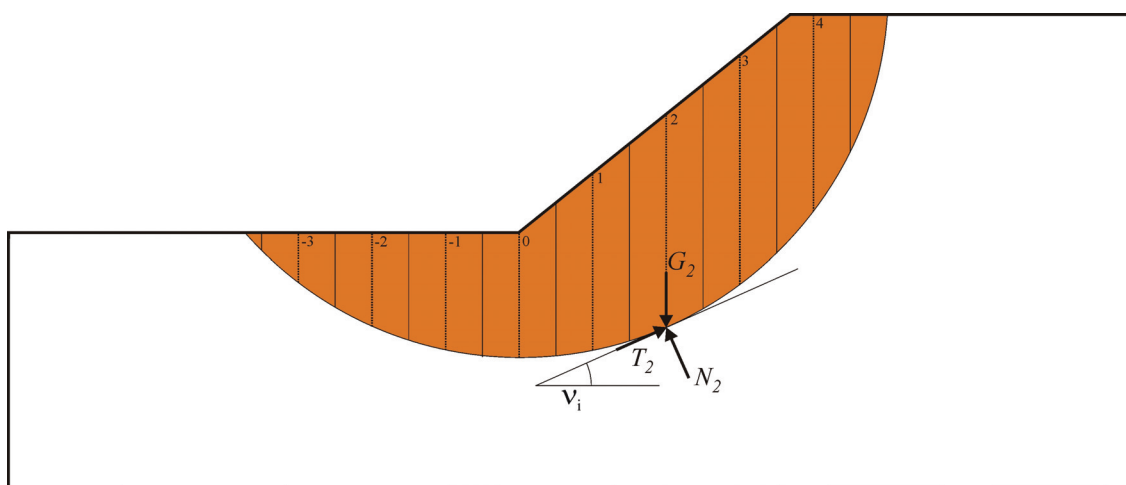


Abbildung 6.23: Gleitfläche (orange) an einem Hang. Die Fläche über dem Gleitkreis wird in Lamellen (-3 bis 4) unterteilt, deren Eigenlast G_i ermittelt wird. Über den Tangentialwinkel v_i kann die Eigenlast in eine Normalkomponente N_i und eine Tangentialkomponente T_i zerlegt werden. Die Abbildung zeigt die Komponenten für Lamelle 2 (verändert nach Simmer, 1994).

Diese Fläche wird beim Lamellenverfahren in gleichbreite, vertikale Sektoren (Lamellen) eingeteilt. Für diese Lamellen werden die Eigenlasten (G_i) berechnet und im Schwerpunkt angesetzt (Simmer, 1994). Am Schnittpunkt der Wirkungslinie der Eigenlast mit dem Gleitkreis wird der Tangentialwinkel ν_i ermittelt, wodurch die Eigenlast in eine Normalkomponente und eine Tangentialkomponente zerlegt werden kann (Abb. 6.23).

Mit der Eigenlast G_i und dem Tangentialwinkel ν_i ergeben sich deren Normalkomponente N_i und Tangentialkomponente T_i in kN/m für die Lamelle i nach Simmer (1994) als:

$$N_i = G_i \cdot \cos \nu_i \quad (6.3)$$

$$T_i = G_i \cdot \sin \nu_i \quad (6.4)$$

In einer vereinfachten Annahme wird der seitliche Erddruck auf die Lamellen vernachlässigt (Simmer, 1994). Die Summe der Tangentialkräfte aller Lamellen einer Gleitfläche entspricht der Summe der antreibenden Kräfte und damit der erforderlichen Scherfestigkeit eines stabilen Hanges. Die Normalkräfte der einzelnen Lamellen bewirken Reibungskräfte, die als rückhaltende Kräfte wirken:

$$R_i = N_i \cdot \tan \varphi'_i \quad (6.5)$$

mit 6.3 ergibt sich daraus:

$$R_i = G_i \cdot \cos \nu_i \cdot \tan \varphi'_i$$

φ' ist hierbei der materialspezifische Winkel der inneren Reibung. Zusätzlich zu den Reibungskräften müssen in der Gleitfläche wirkende Kohäsionskräfte C_i berücksichtigt werden. Diese berechnen sich für die einzelnen Lamellen aus der materialspezifischen Kohäsion c_i und der Fläche der Lamelle A_i aus:

$$C_i = c_i \cdot A_i \quad (6.6)$$

Die wirkenden Kohäsionskräfte bilden zusammen mit den Reibungskräften die Summe der rückhaltenden Kräfte:

$$\sum_{Rück} = \sum R_i + \sum C_i = \sum G_i \cdot \cos \nu_i \cdot \tan \varphi'_i + \sum c_i \cdot A_i \quad (6.7)$$

Ist der Einfluss des Porenwasserdruckes zu berücksichtigen wird die Normalkraft N auf die effektive Normalkraft N' reduziert. Die Standsicherheit kann über den Sicherheitsfaktor μ ausgedrückt werden. Dieser beschreibt nach Meskouris et al. (2007) das Verhältnis aller rückhaltenden Kräfte bzw. der durch sie verursachten Momente zur Summe aller treibenden Kräfte bzw. der durch sie verursachten Momente (Simmer, 1994).

$$\mu = \frac{\sum M_{Rück}}{\sum M_{Treib}} = \frac{\sum F_{Rück}}{\sum F_{Treib}} = \frac{\sum N' \cdot \tan \varphi' + \sum c \cdot A}{\sum G \cdot \sin \nu} \quad (6.8)$$

Der Sicherheitsfaktor drückt also das Verhältnis der vorhandenen Scherfestigkeit zur erforderlichen Scherfestigkeit aus (Simmmer, 1994). Bei den Berechnungen mit dem erweiterten Untergrundmodell des Arbeitsgebietes wurde eine Kombination des beschriebenen Lamellenverfahrens mit der Finiten-Element-Methode genutzt. Hierbei werden alle auf die einzelnen Lamellen jedes Gleitkörpers wirkenden Kräfte berücksichtigt. Im ersten Schritt werden hierbei ausgewählte Gleitflächen für einen zuvor definierten Bereich (Abb. 6.24) berechnet. Die zugehörigen Gleitkreise haben Radien zwischen 18.8 m und 282.5 m. Für jede dieser Gleitflächen erfolgt die Unterteilung nach dem Lamellenverfahren.

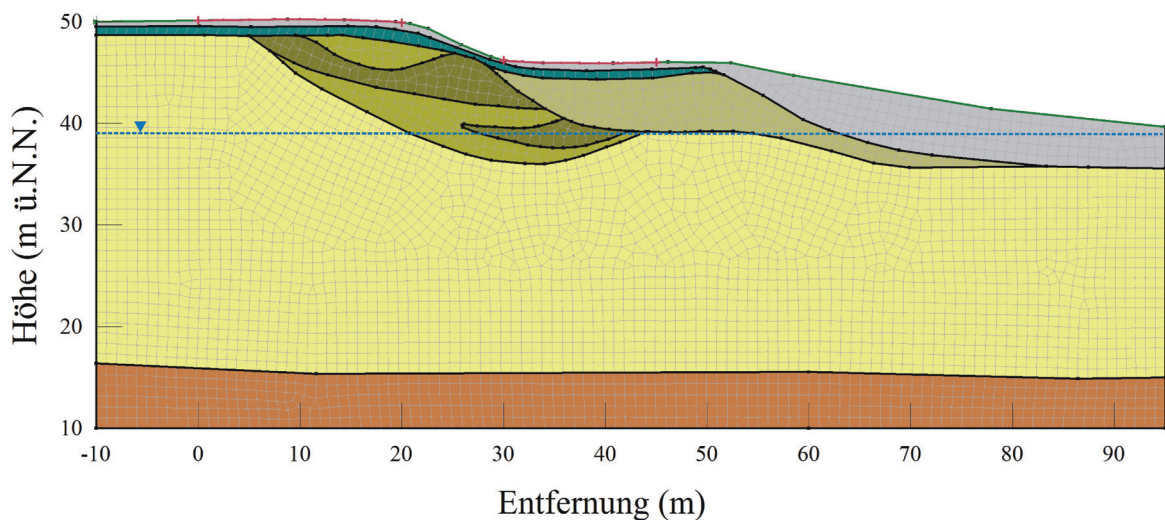


Abbildung 6.24: Erweitertes Modell für die Berechnung des Sicherheitsfaktors. Die blaue Linie zeigt den initialen Grundwasserstand. Die roten Linien auf der Modelloberfläche zeigen den Anfangs- und den Endbereich für alle Gleitflächen die berechnet werden sollen.

Für jede Lamelle wird im Finiten-Element-Modell des Hanges das Element, auf dem der Mittelpunkt der Lamellenbasis auf der Gleitfläche liegt, identifiziert. Über diese Elemente werden die wirkenden Normal- und Tangentialspannungen an den Basispunkten der Lamellen berechnet. Der Tangentialwinkel ist über die Berechnung der Gleitflächen bekannt. Aus diesen Parametern werden alle wirkenden, antreibenden und rückhaltenden Kräfte berechnet und das Verhältnis daraus gebildet (Geoslope, 2007; Meskouris et al., 2007). Liegt dieses Verhältnis über 1 ist der Hang potentiell stabil, liegt es darunter ist der Hang potentiell instabil.

Aus allen untersuchten Gleitflächen wurde die Fläche mit dem geringsten Sicherheitsfaktor ermittelt. Neben den Materialparametern (vgl. Kapitel 6.1.3) wurde dem Modell vor den Berechnungen ein initialer Grundwasserstand von 38.86 m ü. NN zugewiesen, was dem mittleren Rheinpegel zu römischen Zeiten nach Köhler (1941) entspricht. Für das erweiterte Modell ergibt sich ein Sicherheitsfaktor von $\mu=2.541$. Die statische Standsicherheit des Hanges ist demnach gegeben.

SEISMISCHE BELASTUNG

Die Berechnungen zur Hangstabilität unter dynamischer Belastung erfolgt in mehreren Schritten:

- (1) Ermittlung des Sicherheitsfaktors im statischen Lastfall.

- (2) Berechnung der Reaktion des Modellgitters auf die dynamische Belastung und Ermittlung des Sicherheitsfaktors im zeitlichen Verlauf.
- (3) Umrechnung von programmbedingten Überbeanspruchungen einzelner Elemente auf die Nachbarelemente.
- (4) Ermittlung des Sicherheitsfaktors im statischen Lastfall nach dem Ende der Belastungseinwirkung.

Für die Berechnung der Modellreaktion auf die dynamische Belastung (2) wird als Randbedingung an der Modellunterkante der berechnete zeitliche Verlauf der horizontalen und vertikalen Beschleunigungen der 16 Erdbebenszenarien angesetzt. Für den linken und rechten Rand werden die Knotenpunkte des Gitternetzes in vertikaler Richtung fixiert, in horizontaler Richtung sind diese frei beweglich. Die Knotenpunkte am unteren Rand sind in beide Richtungen fixiert.

Die Maximalbeschleunigungen der einzelnen Seismogramme können Tabelle 6.7 in Kapitel 6.2.1 entnommen werden. Die Seismogramme wurden abhängig von der Herdentfernung auf Längen von 40 s, 50 s und 60 s begrenzt und mit 80 Zeitschritten/s eingelesen. Bei der Berechnung der Erdbebeneinwirkung wird die Reaktion aller Knotenpunkte des Gitternetzes des Modells auf die Beschleunigung iterativ im Zeitbereich berechnet. Den Materialien im Modell werden, neben den Materialkennwerten die Tabelle 6.5 in Kapitel 6.1 entnommen werden können, Funktionen für den normierten Schermodul in Abhängigkeit von der Scherdehnung und für die Materialdämpfung in Abhängigkeit von der Scherdehnung zugewiesen.

Der Schermodul G ist das Maß für den Materialwiderstand eines Körpers gegen Scherkräfte (Meskouris et al., 2007). Die Dämpfung eines Lockersedimentes beschreibt den Energieverlust den seismische Wellen beim Durchlaufen dieses Materials, durch Reibungskräfte im Korngefüge erfahren (Meskouris et al., 2007). Das Verhalten eines Lockersedimentes unter zyklischer Belastung, wie sie bei einem Erdbeben auftritt ist ab einem Grenzwert der Scherdehnung etwa 10^{-5} (Hardin und Drnevich, 1972), nicht linear (Kawase, 2003). Der Schermodul nimmt mit zunehmender Scherdehnung ab, während die Dämpfung ansteigt (Studer und Koller, 1997). Um dieses Verhalten zu berücksichtigen kann nach Kramer (1996) ein äquivalent linearer Ansatz gewählt werden, um näherungsweise das Bodenverhalten zu simulieren.

Bei diesem Ansatz werden zunächst Werte für den Schermodul und die Dämpfung angenommen, mit denen das Bodenverhalten bei dynamischer Belastung berechnet wird (Studer und Koller, 1997). Aus den so ermittelten mittleren Dehnungen werden der Schermodul und die Dämpfung neu berechnet. Dies wiederholt sich in einem iterativen Prozess bis die Abweichung zwischen den angenommenen und den berechneten Werten hinreichend gering ist (Studer und Koller, 1997).

Für die Berechnungen mit dem Modell des Rheinhangs wurden Funktionen von Seed und Idris (1970) für den quartären Untergrund und von Vucetic und Dobry (1991) für die tertiären Sedimente, die quartären Sande, den Hochflutlehm und die Auffüllungen genutzt, die von Weber (2007) für die Sedimente in der Niederrheinischen Bucht vorgeschlagen wurden. Abbildung 6.25 zeigt die Beziehungen von Schermodul und Dämpfung zur Scherdehnung für die verwendeten Materialien.

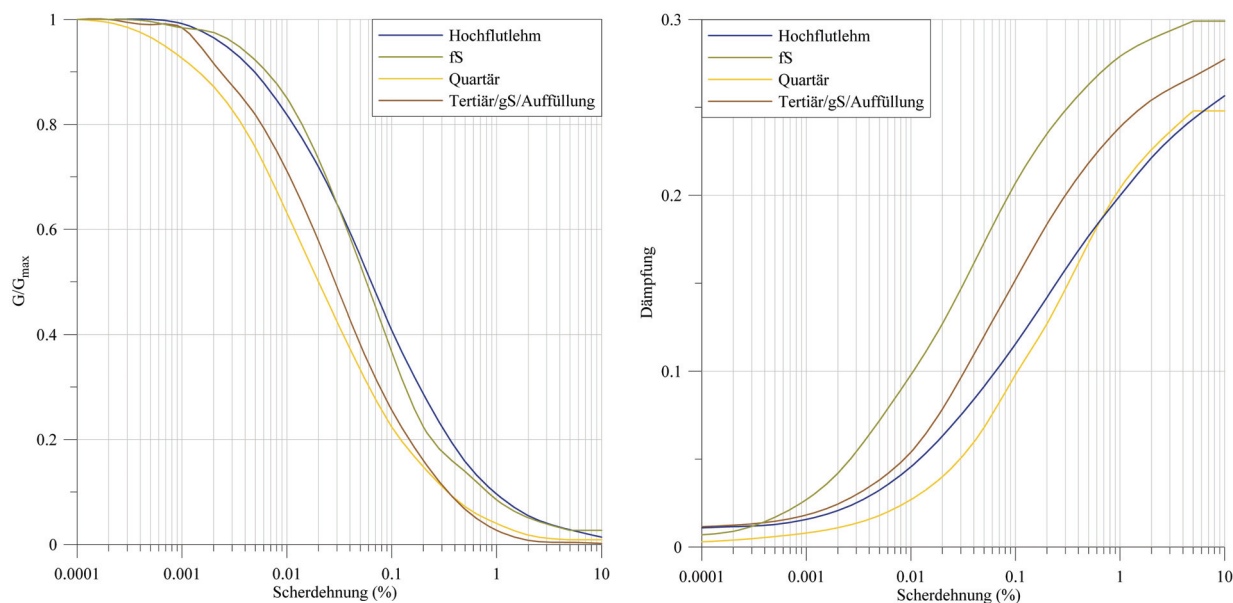


Abbildung 6.25: Normierter Schermodul (links) und Dämpfung (rechts) in Abhängigkeit von der Scherdehnung für die im Modell verwendeten Materialien (nach Seed und Idris, 1970; Vucetic und Dobry, 1991).

Als Ergebnis der Berechnung der Reaktion des Modells auf die Eingangsbeschleunigung, erhält man Beschleunigung, Geschwindigkeit und Verschiebung für jeden berechneten Zeitschritt und für jeden Knotenpunkt im Modell (Abb. 6.26). Hierbei werden sämtliche zuvor eingestellten Randbedingungen, Materialparameter und Geometrievorgaben berücksichtigt.

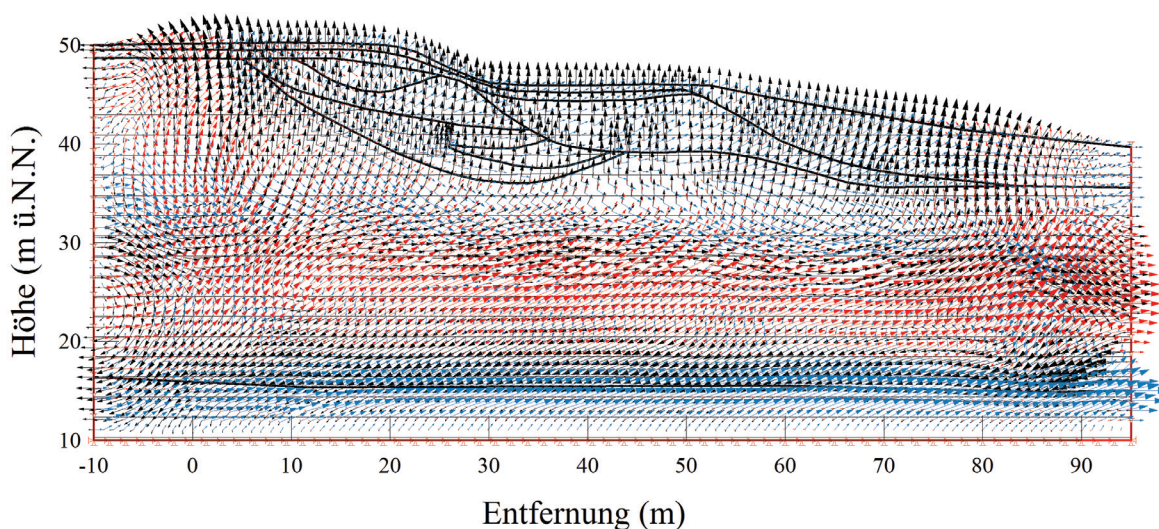


Abbildung 6.26: Vektordarstellung der Beschleunigung (blau), der Geschwindigkeit (schwarz) und der Verschiebung (rot) für alle Knotenpunkte des Modells für eine Beispieleingangsbeschleunigung. Zur besseren Visualisierung wurde die Vektorlänge überhöht. Der Maximalwert der Beschleunigung liegt in diesem Beispiel bei 9.9 m/s², der Geschwindigkeit bei 0.5 m/s und der maximale Verschiebungsbetrag bei 0.065 m.

Bei der Berechnung kann es durch Veränderung des Porenwasserdrucks oder durch Veränderungen im Korngefüge der Materialien zu Überbeanspruchungen im Modell kommen (Geostudio, 2007). Dabei würden bei einer Darstellung als Spannungskreis Teile des Kreises über der Schergraden liegen. Dies kann in der Realität nicht vorkommen, da der Boden ausweichen würde. Im Modell müssen solche Überbeanspruchungen in einem zusätzlichen Schritt auf die Nachbarelemente verteilt werden. Das Resultat sind die bereinigten

Deformationswerte, bei denen die überschüssigen Spannungen auf benachbarte Elemente umgerechnet wurden. Diese Deformationswerte zeigen die tatsächliche, permanente Verschiebung aller Knotenpunkte im Modell nach der Einwirkung der Bodenbeschleunigung.

Zur Abschätzung der Hangstabilität über den zeitlichen Verlauf wird für jeden Zeitschritt der Sicherheitsfaktor nach der zuvor beschriebenen Methode berechnet (Abb. 6.27).

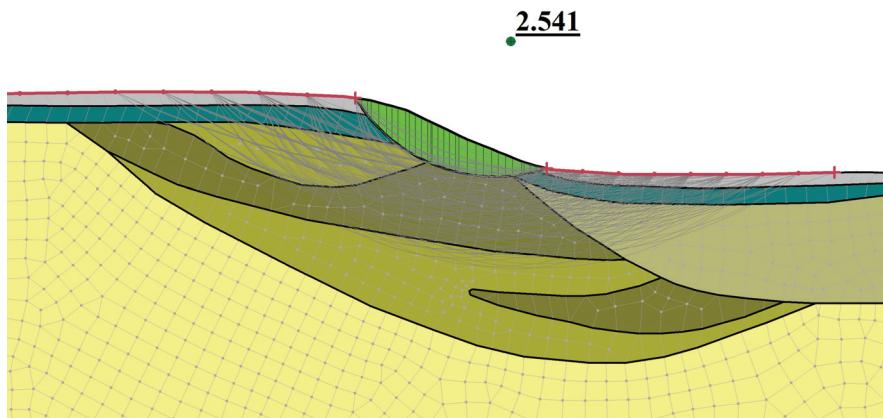


Abbildung 6.27: Ausschnitt aus dem erweiterten Modell mit den berechneten Gleitflächen (graue Linien). Aus den Gleitflächen wird die Fläche mit dem geringsten Sicherheitsfaktor für jeden Zeitschritt ermittelt (grüne Fläche). Für eine bessere Übersichtlichkeit sind nur 200 der 651 berücksichtigten Gleitflächen eingezeichnet.

Auf diese Weise kann überprüft werden, ob der Sicherheitsfaktor des Hanges während eines Erdbebens einen Wert $\mu < 1$ erreicht und es damit zur Deformation des Hanges kommen kann. Die Ergebnisse der Berechnungen mit den Erdbebenszenarien an den 16 Störungssegmenten zeigen, dass die Hangstabilität zu keinem Zeitpunkt der Berechnungen beeinträchtigt ist. Tabelle 6.8 fasst die Ergebnisse der Berechnungen zusammen.

Tabelle 6.8: Sicherheitsfaktoren der statischen und dynamischen Standsicherheitsberechnungen von 651 potentiellen Gleitkreisen im erweiterten Modell des Arbeitsgebietes . SF_{statisch} ist der Sicherheitsfaktor vor, SF_{min} der minimale Sicherheitsfaktor während und SF_{post} der Sicherheitsfaktor nach der dynamischen Belastung. PGA („Peak Ground Acceleration“) bezeichnet die maximal Bodenbeschleunigung die an der Modellunterkante angelegt wird.

| Ereignis | Dauer (s) | PGA (m/s ²) | SF_{statisch} | SF_{min} | SF_{post} | Perm. Deformation (mm) |
|----------|-----------|-------------------------|------------------------|-------------------|--------------------|------------------------|
| S01 | 40.0 | 1.96 | 2.541 | 1.827 | 2.575 | 0 |
| S02 | 40.0 | 5.91 | 2.541 | 1.426 | 2.742 | 0 |
| S03 | 40.0 | 7.84 | 2.541 | 1.524 | 2.588 | 0 |
| S04 | 40.0 | 11.60 | 2.541 | 1.412 | 2.541 | 0 |
| S05 | 50.0 | 0.29 | 2.541 | 1.944 | 2.591 | 0 |
| S06 | 40.0 | 2.82 | 2.541 | 1.652 | 2.612 | 0 |
| S07 | 40.0 | 2.34 | 2.541 | 1.606 | 2.565 | 0 |
| S08 | 40.0 | 1.80 | 2.541 | 1.76 | 2.718 | 0 |
| S09 | 40.0 | 1.09 | 2.541 | 2.223 | 2.541 | 0 |
| S10 | 65.0 | 0.44 | 2.541 | 2.025 | 2.54 | 0 |
| S11 | 50.0 | 0.65 | 2.541 | 2.03 | 2.539 | 0 |
| S12 | 40.0 | 1.39 | 2.541 | 1.947 | 2.536 | 0 |
| S13 | 40.0 | 0.88 | 2.541 | 1.8077 | 2.545 | 0 |
| S14 | 50.0 | 0.68 | 2.541 | 2.0018 | 2.566 | 0 |
| S15 | 60.0 | 0.46 | 2.541 | 2.216 | 2.544 | 0 |
| S16 | 65.0 | 0.80 | 2.541 | 2.075 | 2.552 | 0 |

Die Ergebnisse zeigen das selbst bei Bodenbeschleunigungen von >1 g der Sicherheitsfaktor nicht unter einen Wert von 1.4 sinkt. Am Modell des Hanges sind keine permanenten Deformationen festzustellen. In Abbildung 6.28 sind die berechneten Sicherheitsfaktoren für den Hang im zeitlichen Verlauf für die sechzehn Erdbebenereignisse aufgetragen. Den Ergebnissen kann entnommen werden, dass die Stabilität des Hanges während und nach der Erdbebeneinwirkung gegeben ist.

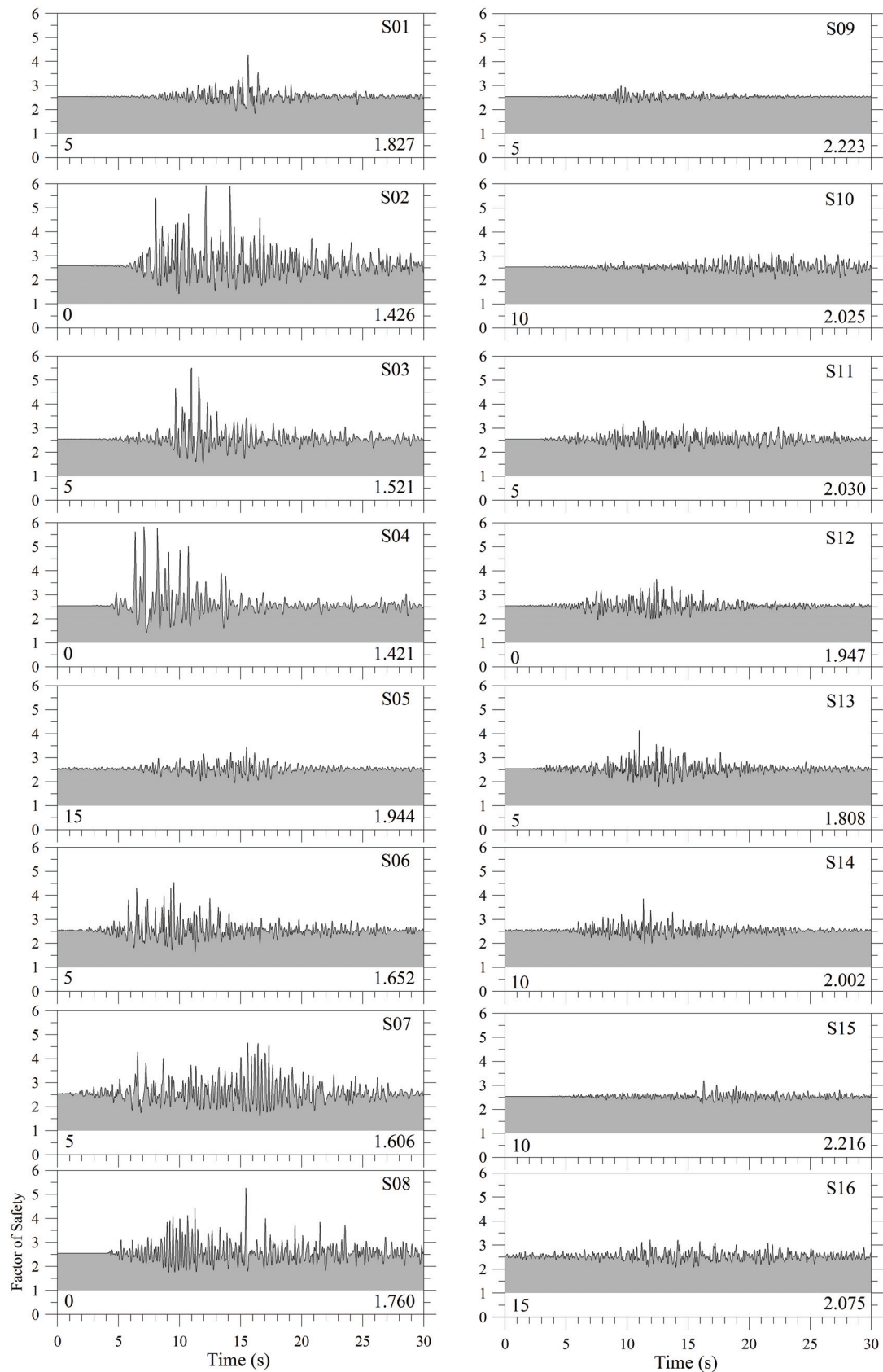


Abbildung 6.28: Der Sicherheitsfaktor des Hanges im zeitlichen Verlauf bei der Einwirkung der 16 berechneten Erdbebenereignisse. Die X-Achsen zeigen die Zeit in Sekunden, die Y-Achsen den Sicherheitsfaktor. Die Zahl auf der linken Seite jedes Graphen gibt die Zeit nach Beginn der Berechnung in s, die Zahl auf der Rechten zeigt den minimalen Sicherheitsfaktor während des gesamten zeitlichen Verlaufs (nach Hinzen et al. 2011, unveröffentlicht).

HYDROLOGISCHE EINWIRKUNG

Die Zusammensetzung des gewachsenen Bodens im Bereich der Archäologischen Zone zeigt linsenartige Vorkommen des bereits erwähnten Fein- bis Mittelsandes. Die Korngrößenverteilung des Sandes zeigt, dass die Verteilungskurve hauptanteilig im von Busch und Luckner (1974) definierten Bereich für besonders erosionsanfällige Sedimente (0.02-0.6 mm) liegt. Im Arbeitsgebiet tritt der Sand meist unter Bedeckung von Hochflutsedimenten und/oder anthropogenen Auffüllungen auf. Diese Situation zusammen mit den Materialeigenschaften legen nahe, den Untergrund des Arbeitsgebietes auf mögliche Erosionsvorgänge zu überprüfen. Voraussetzung für derartige Erosionsvorgänge ist die Versickerung von Oberflächenwasser bzw. Grundwasserströmungen um Materialtransport zu bewirken.

Unterirdische Vorgänge bei denen durch Wassereinwirkung feines Material abtransportiert wird, werden als Suffosion bezeichnet. Dies führt zu einer Vergrößerung des Porenvolumens. Entstehen dadurch Hohlräume und/oder Röhren wird der Vorgang als Tunnelerosion bezeichnet (Jones, 2004a; Verachtert et al., 2009).

Durch Tunnelerosion können Röhren und/oder Hohlräume mit einem Durchmesser von wenigen Millimetern bis in den Meterbereich entstehen (Farifteh und Soeters, 1999; Jones, 2004a). Botschek et al. (2002) beschreiben die Begünstigung von Tunnelerosion durch von Regenwürmern verursachte Makroporen und Grabgänge von Kleinsäugetieren. Durch diese Beschädigungen des Bodens werden Wegsamkeiten für Oberflächenwasser geschaffen, die zu einer schnelleren Versickerung in den Bodenkörper führen.

Crosta und di Prisco (1999) stellen eine Fallstudie aus Italien vor, in der es durch die Einwirkung von Oberflächenwasser zu Bodenverflüssigung ohne Erschütterungseinwirkung kommt. Hierbei wurde durch anthropogenen Einfluss der Verbund einer abdichtenden Schicht unterbrochen und so Versickerung ermöglicht. Dies führte zu Tunnelerosion und schließlich zu einem durch Bodenverflüssigung induzierten Hangrutsch. Um die Einwirkung von Oberflächenwasser auf den Untergrund im Arbeitsgebiet zu untersuchen, wurden Starkregenereignisse auf Grundlage der Bemessungsregentabelle der Stadtentwässerungsbetriebe Köln (STEB, 2011) simuliert. Für die Berechnungen wurde ein Regenereignis mit einer Dauer von 60 min mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren gewählt, das mit Faktoren zwischen 4 und 10 multipliziert wurde (Tab. 6.9). Als Wiederkehrzeit wird hierbei der Zeitraum bezeichnet der statistisch zwischen zwei Ereignissen mit den angenommenen Regenmengen liegt. Die Niederschlagsmenge für dieses Ereignis liegt bei 40.9 mm bzw. 40.9 l/m². Die Berechnungen wurden mit dem Programmteil SEEP/W aus dem Programmpaket GEOSTUDIO 2007 für die in Tabelle 6.9 aufgeführten Regenereignisse durchgeführt.

Tabelle 6.9: Parameter der simulierten Regenereignisse auf Grundlage der Bemessungsregentabelle der Station Rondorf der Kölner Stadtentwässerungsbetriebe (STEB, 2011).

| Ereignis | Multiplikations-Faktor | Gesamtniederschlags-menge (mm) | Niederschlags-menge (m/s) | Niederschlags-dauer (min) | Simulationsdauer (h) |
|----------|------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|
| BMK_1 | 1 | 40.9 | 1.136E-05 | 60 | 4/8 |
| BMK_4 | 4 | 163.6 | 4.544E-05 | 60 | 4/8 |
| BMK_5 | 5 | 204.5 | 5.681E-05 | 60 | 4/8 |
| BMK_5.25 | 5.25 | 214.7 | 5.965E-05 | 60 | 4/8 |
| BMK_5.50 | 5.5 | 225.0 | 6.249E-05 | 60 | 4/8 |
| BMK_6 | 6 | 245.4 | 6.817E-05 | 60 | 4/8 |
| BMK_6.50 | 6.5 | 265.9 | 7.385E-05 | 60 | 4/8 |
| BMK_6.75 | 6.75 | 276.1 | 7.669E-05 | 60 | 4/8 |
| BMK_7 | 7 | 286.3 | 7.953E-05 | 60 | 4/8 |
| BMK_7.25 | 7.25 | 296.5 | 8.237E-05 | 60 | 4/8 |
| BMK_7.50 | 7.5 | 306.8 | 8.521E-05 | 60 | 4/8 |
| BMK_8 | 8 | 327.2 | 9.089E-05 | 60 | 4/8 |
| BMK_9 | 9 | 368.1 | 1.023E-04 | 60 | 4/8 |
| BMK_10 | 10 | 409.0 | 1.136E-04 | 60 | 4/8 |

Die Schicht der Hochflutsedimente im Bereich des Rathausplatzes ist durch Konstruktionen und Baugruben stark gestört. Um sich diesen Verhältnissen mit dem Modell zu nähern wurde die Schicht unterbrochen. Dazu wurden im zentralen Bereich des Modells drei 0.4 m breite Bereiche in die Hochflutsedimente eingefügt, denen die Materialeigenschaften der quartären Ablagerungen zugewiesen wurden. Die Geometrie der gestörten Bereiche ist hierbei eine Minimalabschätzung. Im Gegensatz zu Berechnungen mit ungestörten Hochflutsedimenten bei denen ein Großteil des Niederschlagswassers auf dieser abdichtenden Schicht horizontal abfließt, zeigen die Berechnungen mit gestörten Hochflutsedimenten eine erhöhte Versickerung des Wassers in den Hangkörper.

Wie das Modell der Erdbebeneinwirkung dient dieses stark vereinfachte 2D Modell der Plausibilitätsabschätzung. Ein detaillierteres numerisches Modell der Verhältnisse auf dem Rathausplatz ist wegen der komplexen Situation nicht realisierbar.

Um den Durchfluss durch das Modell bestimmen zu können wurden drei Kontrollflächen eingefügt mit denen die Wassermenge zu jedem Zeitpunkt sowie die Gesamtwassermenge, welche die jeweilige Fläche durchfließt, bestimmt werden kann. Die Flächen liegen in einer Tiefe von ca. 0.5 m u. GOK über den Hochflutsedimenten (Fläche 1), 2.3 m u. GOK unter den Hochflutsedimenten (Fläche 2) und in einer Tiefe von 7.3-10.3 m u. GOK unter der zentralen Sandlinse (Fläche 3). Die Flächen decken einen horizontalen Bereich von 6.0 m ab. Abbildung 6.29 zeigt das Modell für die hydrologischen Berechnungen.

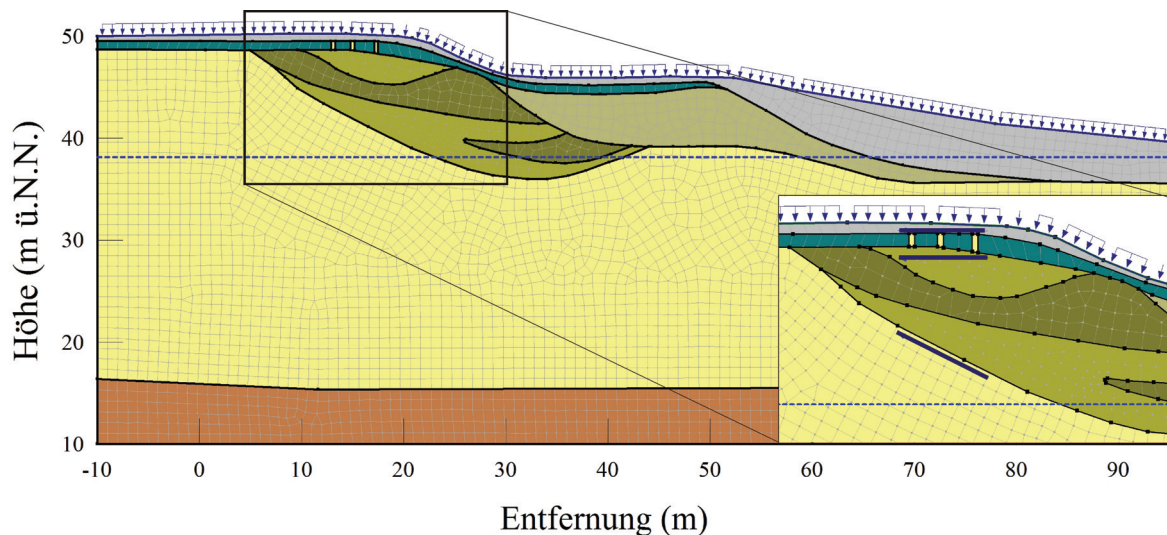


Abbildung 6.29: Ausschnitt des Untergrundmodells für die hydrologischen Berechnungen mit drei Unterbrechungen in den Hochflutsedimenten. Die violetten Linien sind die Kontrollflächen. Die blauen Pfeile zeigen den Einwirkungsbereich des Niederschlages.

Bei der Berechnung der Einwirkung von verschiedenen Regenereignissen auf den Hang wurden Ereignisse verwendet deren Regenmengen dem 4- bis 10-fachen der Regenmenge des Bemessungsregenereignisses entsprechen. Diese Annahme wurde getroffen, um die ehemaligen baulichen Verhältnisse auf dem Rathausplatz mit einzubeziehen. Im Modell wird die Einwirkung des Niederschlagswassers auf den zweidimensionalen Schnitt des Modells berücksichtigt, für den bei der Berechnung eine Ausdehnung von 1 m senkrecht zur Modellebene angenommen wird. Da jedoch der Platz in früheren Zeiten zumindest teilweise bebaut war (z.B. mittelalterliche Synagoge mit einer abgeschätzten Dachfläche von min. 180 m²) und somit Teile der Platzfläche versiegelt waren konnte das Wasser nicht gleichmäßig versickern. Es kann daher angenommen werden, dass sich der Niederschlag der auf größere Flächen gefallen ist gesammelt hat und konzentriert in unbebauten und unversiegelten Bereichen versickert ist. Auf diese Weise erhöht sich die Wassermenge für bestimmte Bereiche des Gebietes. Neben den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Materialkennwerten muss für die einzelnen Materialien in der hydrologischen Berechnung das Verhältnis zwischen volumetrischem Wassergehalt und Saugspannung angegeben werden. Im Programm SEEP/W sind charakteristische Funktionen für die gängigsten Lockersedimente integriert. Aus dieser Bibliothek wurden die in Abbildung 6.30 dargestellten Funktionen für die verwendeten Materialien ausgewählt.

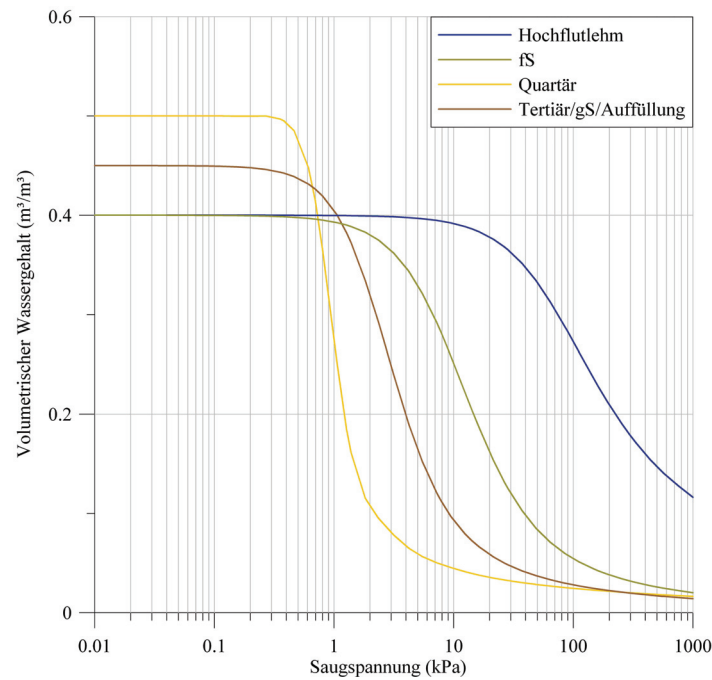


Abbildung 6.30: Verhältnis von volumetrischem Wassergehalt zur Saugspannung für die verwendeten Materialien (Geoslope, 2007). Die Abkürzungen fS bzw. gS bezeichnen die Feinsande respektive die Grobsande.

Neben dem Verhältnis des volumetrischen Wassergehaltes zur Saugspannung werden den Materialien Funktionen für die hydraulische Leitfähigkeit zugewiesen. Das Verhältnis der hydraulischen Leitfähigkeit zur Saugspannung wird mittels der Methode nach van Genuchten (1980) auf Grundlage des Durchlässigkeitsbeiwertes der Materialien und des zuvor definierten Verhältnisses des volumetrischen Wassergehaltes zur Saugspannung ermittelt. Für die Durchlässigkeitsbeiwerte wurden Angaben aus den Erläuterungen zur ingenieurgeologischen Karte von Köln genutzt (Blatt 5007, Geologisches Landesamt NRW, 1986). Die quartären Kiese als Grundwasserleiter wurden nach DIN 18130 als stark durchlässig angesehen. Nach Lang et al. (2003) wurde daher ein Durchlässigkeitsbeiwert von 0,02 m/s verwendet. Abbildung 6.31 zeigt die ermittelten Funktionen.

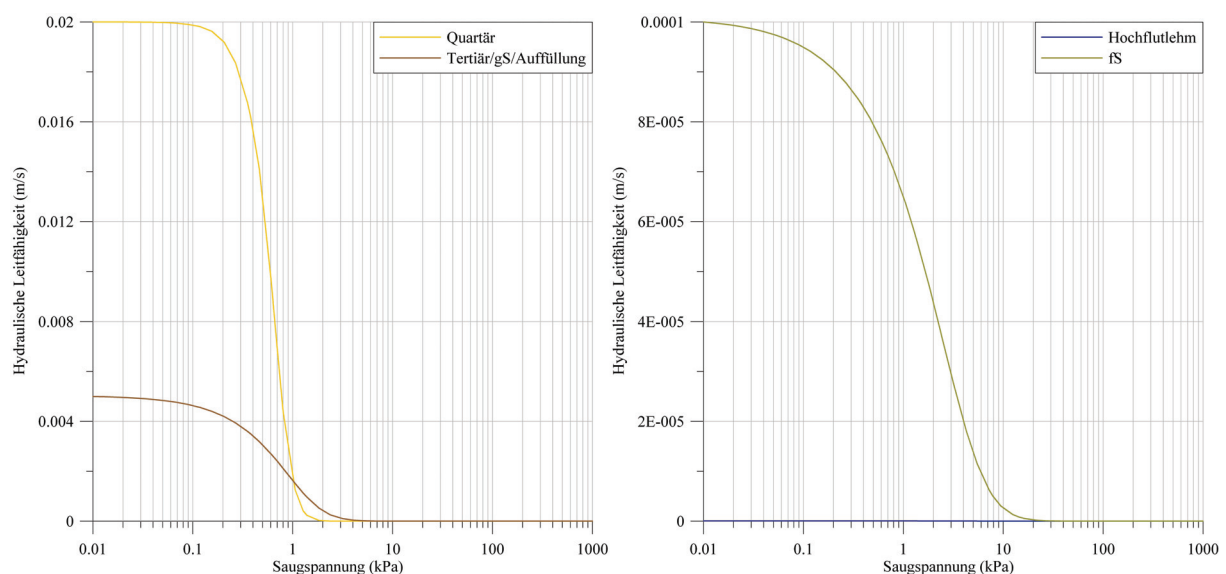


Abbildung 6.31: Verhältnis der hydraulischen Leitfähigkeit zur Saugspannung für die verwendeten Materialien (Geoslope, 2007). Die Abkürzungen fS bzw. gS bezeichnen die Feinsande respektive die Grobsande.

Die Berechnungen haben gezeigt, dass sich durch das Niederschlagswasser eine Versickerungsfront bildet, die sich mit zunehmender Zeit, vertikal durch das Modell bewegt. Neben der einwirkenden Wassermenge ist daher auch der Beobachtungszeitraum ausschlaggebend für die Beurteilung der Ergebnisse. Tabelle 6.10a zeigt die Durchflussmengen durch die drei verwendeten Kontrollflächen bei verschiedenen Regenereignissen für eine Simulationslänge von vier Stunden, Tabelle 6.10b für eine Simulationslänge von acht Stunden. Abbildung 6.32 zeigt eine graphische Darstellung der Ergebnisse.

Tabelle 6.10a: Durchflussmengen durch die Kontrollflächen bei verschiedenen Regenereignissen für eine Simulationslänge von vier Stunden. Die Gesamtniederschlagsmenge bezeichnet hierbei den Niederschlag der auf den 4-10 m breiten Streifen des Modells fällt.

| Ereignis | Gesamtniederschlagsmenge (mm) | Gesamtdurchfluss Fläche 1 (m³) | Gesamtdurchfluss Fläche 2 (m³) | Gesamtdurchfluss Fläche 3 (m³) |
|----------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| BMK_4 | 163.6 | 1.3 | <0.1 | -2.1E-11 |
| BMK_5 | 204.5 | 1.6 | <0.1 | -2.0E-10 |
| BMK_5.25 | 214.7 | 2.2 | 2.2 | -3.0E-10 |
| BMK_5.50 | 225.0 | 2.3 | 2.4 | -4.0E-10 |
| BMK_6 | 245.4 | 2.6 | 2.7 | -6.8E-10 |
| BMK_6.50 | 265.9 | 2.9 | 3.3 | -8.8E-10 |
| BMK_6.75 | 276.1 | 3.1 | 3.6 | 6.6E-09 |
| BMK_7 | 286.3 | 3.3 | 3.9 | -1.34E-09 |
| BMK_7.25 | 296.5 | 3.5 | 4.3 | 0.2 |
| BMK_7.50 | 306.8 | 3.6 | 4.5 | 0.3 |
| BMK_8 | 327.2 | 4.1 | 5.3 | 0.9 |
| BMK_9 | 368.1 | 4.7 | 6.0 | 1.5 |
| BMK_10 | 409.0 | 5.5 | 7.1 | 1.7 |

Tabelle 6.10b: Durchflussmengen durch die Kontrollflächen bei verschiedenen Regenereignissen für eine Simulationslänge von acht Stunden. Die Gesamtniederschlagsmenge bezeichnet hierbei den Niederschlag der auf den 4-10 m breiten Streifen des Modells fällt.

| Ereignis | Gesamtniederschlagsmenge (mm) | Gesamtdurchfluss Fläche 1 (m³) | Gesamtdurchfluss Fläche 2 (m³) | Gesamtdurchfluss Fläche 3 (m³) |
|----------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| BMK_4 | 163.6 | 1.3 | <0.1 | -4.95E-10 |
| BMK_5 | 204.5 | 1.6 | <0.1 | -1.58E-09 |
| BMK_5.25 | 214.7 | 2.3 | 2.7 | -2.00E-09 |
| BMK_5.50 | 225.0 | 2.3 | 2.8 | -2.00E-09 |
| BMK_6 | 245.4 | 2.6 | 3.1 | -3.70E-09 |
| BMK_6.50 | 265.9 | 2.9 | 3.7 | <0.1 |
| BMK_6.75 | 276.1 | 3.2 | 4.0 | <0.1 |
| BMK_7 | 286.3 | 3.3 | 4.3 | <0.1 |
| BMK_7.25 | 296.5 | 3.5 | 4.7 | 1.5 |
| BMK_7.50 | 306.8 | 3.7 | 4.9 | 1.7 |
| BMK_8 | 327.2 | 4.2 | 5.7 | 2.1 |
| BMK_9 | 368.1 | 4.7 | 6.4 | 2.8 |
| BMK_10 | 409.0 | 5.6 | 7.5 | 3.2 |

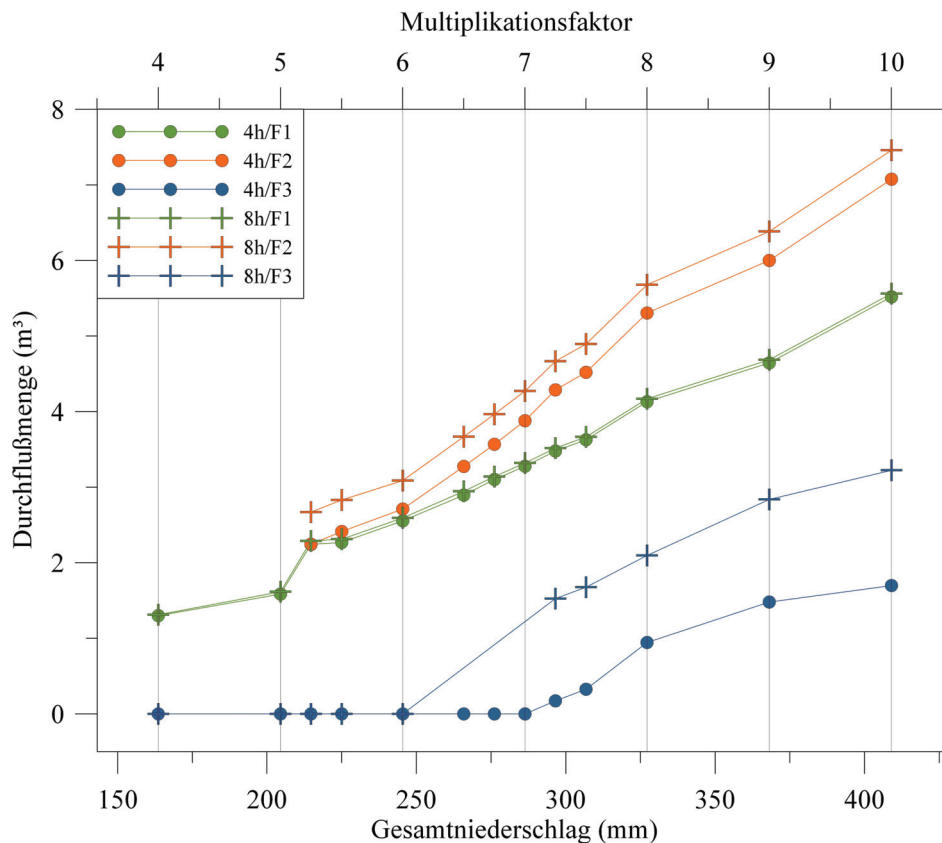


Abbildung 6.32: Durchflussmengen durch die Kontrollflächen (F1-F3) im Verhältnis zur Gesamtniederschlagsmenge für Beobachtungszeiträume von 4 bzw. 8 Stunden. Die Gesamtniederschlagsmenge bezeichnet hierbei den Niederschlag der auf den 4-10 m breiten Streifen des Modells fällt (nach Hinzen et al., unveröffentlicht).

Bei den Niederschlags- und Versickerungsmengen wird von einer Modellerstreckung in z-Richtung von 1 m ausgegangen. Die berechneten Wassermengen entsprechen daher den Mengen die bei dem angenommenen Bemessungsregenereignis auf einem vier bis zehn Meter breitem Streifen innerhalb der Modellgrenzen fallen bzw. versickern. Für die Fläche auf dem Plateau ergibt sich so eine berücksichtigte Fläche von ca. 120-300 m² und den auf dieser Fläche fallenden Niederschlag. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem Simulationszeitraum von acht Stunden ab einer Gesamtniederschlagsmenge von knapp 300 mm auf einem 7.25 m breiten Modellstreifen größere Wassermengen durch die Kontrollfläche 3 und damit auch durch die Fein-Mittelsandlinse im Modell fließen. Die Niederschlagsmenge entspricht hierbei dem Bemessungsregenereignis auf einer Fläche von 217.5 m². Dieser Wert liegt unter den ermittelten Dachflächen für die mittelalterliche Synagoge (ca. 180 m²) und der Frauensynagoge (ca. 60 m²) auf denen Niederschlag nicht direkt versickern konnte, sondern abfloss. Tatsächlich dürfte zudem Niederschlagswasser von den benachbarten Gebäuden auf die offenen Platzflächen geflossen sein. Die Grundvoraussetzungen für Erosionsvorgänge im Untergrund sind im Gebiet des Rathausplatzes daher gegeben. Neben den natürlichen Materialtransportwegen hat die Untersuchung des römischen Brunnens in der Apsis gezeigt, das Material in die vorhandenen römischen und mittelalterlichen Brunnen gespült wurde. Für den Bereich des Rathausplatzes wurden bei den archäologischen Ausgrabungen bislang mindestens zehn Brunnenbauwerke gefunden. Der Betrieb dieser Brunnen führt zu einer zusätzlichen Materialentnahme aus dem Untergrund, sei es als Sedimentfracht des geschöpften Wassers oder durch aktive Ausgrabung bei Versandung des Brunnens (Prinz und Strauss, 2006).

7. Zusammenfassung der Ergebnisse

In der hier vorgestellten Studie wurde auf Grundlage eines multidisziplinären Ansatzes die Untersuchung einer archäoseismologischen Fragestellung in der historischen Altstadt von Köln durchgeführt und dokumentiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Teilbereiche zusammengefasst.

TOPOGRAPHIE

Die Untersuchungen der Topographie des Arbeitsgebietes vor der anthropogenen Überprägung der Moderne haben für die Gebäude in der Archäologischen Zone Köln eine Lage direkt oberhalb eines Hanges zu einem ehemaligen Seitenarm des Rheins ergeben. Die topographische Situation wurde schon während der römischen Besiedelungsphase verkompliziert, indem die Hangkante durch Auffüllung nach Osten verlagert wurde, um auf dem Plateau mehr Raum für Gebäudeerweiterungen zu schaffen. Bei den Untersuchungen wurden Ergebnisse von Doppelfeld (1959), Precht (1973), Holthausen (1994), Hinzen und Schütte (2003) und Wiosna (2010) kombiniert und in Bezug zu den lokalen Untergrundverhältnissen gesetzt.

UNTERGRUND

Der Untergrund des Arbeitsgebietes wird von den Ablagerungen der Jüngeren Niederterrasse geprägt. Es treten Kiese, Grob- bis Feinsande sowie tonig-schluffige Hochflutablagerungen auf. Große Bereiche des Untergrundes sind durch anthropogen verfüllte Gruben und Anschüttungen beeinflusst. Felduntersuchungen haben linsenartige Vorkommen von kohäsionslosem Fein- bis Mittelsand nachgewiesen. Die Untersuchungen vor Ort haben gezeigt, dass der Sand im Aufschluss sehr instabil ist und durch bauliche Maßnahmen in Position gehalten werden muss, um die Standsicherheit der umliegenden Bereiche zu gewährleisten. Sedimentologische Untersuchungen zeigen, dass die Möglichkeit zur Verflüssigung des Materials im wassergesättigten Zustand und unter dynamischer Belastung gegeben ist.

Im Bereich des römischen Brunnens wurde der Sand in einer Höhenlage von 37.3 m ü.NN unter, zumindest periodischem, Grundwassereinfluss nachgewiesen. Die natürliche Geländeoberfläche in diesem Bereich liegt bei ca. 46.0 m ü.NN, hinzu kommen zudem mindestens 3.0 m mächtige Auffüllungen die gesichert seit dem vierten Jahrhundert in der Apsis liegen. Nach Youd (2003) nimmt die Verflüssigungswahrscheinlichkeit mit zunehmendem Abstand des Grundwasserspiegels von der Geländeoberkante ab. Mit einem Grundwasserstand bei 38.86 m ü.NN (mittlerer Rheinpegel zu römischen Zeiten nach Köhler, 1961) liegt in diesem Bereich der Grundwasserspiegel >10 m unter der Geländeoberkante und fällt damit in die Zone mit geringer Verflüssigungswahrscheinlichkeit (Youd, 1998). Hinzu kommt, dass die Wahrscheinlichkeit zur Bodenverflüssigung mit zunehmender Auflast abnimmt. Die Lage der Sande in einer Tiefe >10 m unter der Geländeoberkante führt daher ebenfalls zu einer Verminderung der Wahrscheinlichkeit für eine Verflüssigung der Sedimente.

SCHADENSBILD

Das Gesamtschadensbild der Bauwerke in der Archäologischen Zone basiert auf der Auswertung der 3D Laserscandaten des archäologischen Inventars. Auf Grundlage dieser Daten wurden 2828 Schadensbefunde an 2016 unterschiedlichen Lokalisationen identifiziert, georeferenziert, klassifiziert, quantifiziert und in einer Schadendatenbank zusammengefasst. Die Datenbank liegt auf einer CD dem Anhang dieser Arbeit bei. Die Schäden gliedern sich in 1704 Neigungsschäden, 806 Drehungen von Blöcken aus ihrer ursprünglichen Position, 190 Versatzschäden, 117 Riss/Bruchschäden und 11 Schäden die nachweislich auf anthropogenen Einfluss zurückgehen.

Im Praetorium der vierten Bauperiode, im nördlichen Teil des Arbeitsgebietes, konzentrieren sich die Schäden auf die östliche Hälfte des Gebäudekomplexes. In diesem Bereich wurde der Untergrund angeschüttet um das Gebäude über die natürliche Hangkante hinaus nach Osten zu erweitern. Es treten vor allem Neigungsschäden in Richtung Osten auf. Die Schrägstellung dieser Gebäudehälfte hat zudem zu Rissen und Brüchen in der Gesamtstruktur geführt. Im gesamten Gebäudekomplex gibt es keine Anzeichen für Reparatur. Der südliche Teil des Praetoriums aus der dritten Bauperiode folgt dem Schadensbild des nördlichen Teilabschnittes. Im so genannten Porticus Bereich wurde eine Schrägstellung der römischen Gebäudereste in Richtung Osten nachgewiesen, während die mittelalterlichen Gebäudereste keine Schäden zeigen. Im Abwasserkanal, nördlich des Praetoriums, unter der Straße „Kleine Budengasse“ finden sich im westlichen Abschnitt in der aus Tuffblöcken aufgebauten Gewölbedecke vertikale Versätze. Im östlichen Bereich findet sich in der gegossenen Decke ein Bruchschaden in Längsrichtung des Kanals und eine Deformation der Decke in diesem Bereich. Im gesamten Abwasserkanal finden sich Abplatzungen an den Schultern der Gewölbedecke und im unteren Bereich der Seitenwände. Die Versatzschäden im westlichen Abschnitt sowie der Bruch- und Deformationsschaden im östlichen Bereich deuten auf Vertikalbewegungen der Gesamtstruktur hin. Im südlichen Teil des Arbeitsgebietes auf dem heutigen Rathausplatz konnten Schäden sowohl an römischen Befunden, als auch an mittelalterlichen Strukturen nachgewiesen werden. Die ältesten Befunde stammen aus dem ersten Jahrhundert n.Chr. und befinden sich im Bereich der Apsis auf dem Rathausplatz. Hier zeigen Überreste einer Stützmauer Schrägstellungen in Richtung Osten sowie untergeordnet Bruch- und Risssschäden. Der spätantike Brunnen innerhalb der Apsis zeigt starke Deformationen sowie eine Schrägstellung in Richtung Südosten. Bei der archäologischen Ergrabung wurde im tiefsten Bereich der, in Abschnitt 6.1.3 beschriebene, Fein-bis Mittelsand nachgewiesen. Im nördlichen Flügel des spätantiken Vorgängerbaus der Synagoge befindet sich ein zerstörter Hypocaustusboden, der im Mittelalter durch Verfüllung ausgeglichen und überbaut wurde. Direkt unter der Hypocaustanlage steht ebenfalls der instabile Fein-bis Mittelsand an. Schadensbefunde an mittelalterlichen Gebäuderesten wurden an der Mikwe, der Kloake im Bereich der Synagoge sowie an der mittelalterlichen Wohnbebauung auf dem südlichen Rathausplatz nachgewiesen. Das Tauchbecken der Mikwe zeigt Spuren von Reparatur um das Jahr 1000, was eine vorangegangene Beschädigung nahe legt. Der Schacht der Mikwe zeigt eine leichte Schrägstellung nach Süden. Im Eingangsbereich der Mikwe wurde im Untergrund eine kollabierte Wand-Bogen-Struktur gefunden, deren archäologische Interpretation und zeitliche Einordnung jedoch noch nicht abgeschlossen ist. Die Konstruktion grenzt unmittelbar an ein instabiles Sandvorkommen im Untergrund der Nordwand des Gebäudes. Die Kloake in der Nordwest-Ecke der Synagoge zeigt einen deutlichen Deformationsbereich in einer Tiefe zwischen 49.0 und 47.0 m ü.NN. Dieser Befund korreliert mit einer instabilen Sandlinse im direkt anschließenden gewachsenen Boden. Die Bebauungsreste auf dem südlichen Rathausplatz zeigen Deformationen, vertikale

Versätze und Risse. Diese Schäden deuten auf Bewegungen im Baugrund hin. Unklar ist die zeitliche Einordnung der Befunde im Untergrund der mittelalterlichen Frauensynagoge. In diesem Bereich wurden Risse und Schrägstellungen in Richtung Osten an einem Gussfundament und dem darüber liegenden Mauerwerk nachgewiesen.

SCHADENSSZENARIEN

Das Gutenberg-Richter-Seismizitätsmodell für das Gebiet der Niederrheinischen Bucht zeigt, dass potentielle Schadensbeben mit Magnituden $M_w > 5.5$ eine Wiederkehrperiode von mindestens 250 Jahren haben. Durch Erdbeben verursachte Bodenbewegungen sind daher ein realistisches Szenario für die Ursache der strukturellen Gebäudeschäden in Köln.

Die Untersuchungen des Untergrundes zeigen, dass im Arbeitsgebiet nahezu kohäsionsloser im Aufschluss sehr instabiler Fein- bis Mittelsand vorkommt. Dieses erosionsanfällige Material (Busch und Luckner, 1974) legt untergründige Erosion und Hohlraumbildung als weitere mögliche Schadensursache nahe.

ERGEBNISSE DER MODELLRECHNUNGEN

Die vorgestellten Modellrechnungen dienen der Plausibilitätsabschätzung der beiden oben genannten Schadensszenarien. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass die statische Standsicherheit des Hanges in den modellierten 2D Schnitten gegeben ist. Die Berechnung des Modellverhaltens unter dynamischer Belastung durch Anregung mit synthetischen Seismogrammen von 16 Erdbebenszenarien in der Niederrheinischen Bucht haben gezeigt, dass die Hangstabilität selbst bei Bodenbeschleunigungen von bis zu 11.6 m/s^2 gegeben ist.

Die Modellierung von Niederschlagsereignissen belegt, dass große Mengen Wasser in tiefere Untergrundbereiche versickern, somit in den Bereich der instabilen Fein-Mittelsande gelangen und dort zu signifikanter Erosion führen können.

UNTERSTÜTZUNG DER ARCHÄOLOGISCHEN ARBEITEN

Im Zuge der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die dreidimensionale Kartierung der archäologischen Befunde zur Erleichterung und Erweiterung der traditionellen archäologischen Arbeitsweise beitragen kann. Im Fall der mittelalterlichen Kloake konnte der Originalzustand der Struktur virtuell konserviert werden, obwohl der statische Zustand eine komplette Ergrabung ohne Restaurierung verhindert hat. In vielen weiteren Fällen konnten Orthophotos, die aus den dreidimensionalen virtuellen Modellen extrahiert wurden, die genauen Maße und Geometrien einzelner Strukturen liefern, welche als Grundlage oder Erweiterung für die archäologische Aufnahme dienten. Neben den Orthophotos wurden virtuelle Schnitte durch die dreidimensionalen Modelle zur Erfassung von Gesamtstrukturen oder Oberflächenbeschaffenheiten genutzt. Aus den georeferenzierten Modellen konnten zudem auf einfachem Wege Koordinaten von Punkten für die Referenzierung von archäologischen Profilen oder Fundorten extrahiert werden. Auf diesem Wege konnte das Ausmaß von zeitaufwändigen Vermessungskampagnen minimiert werden. Zudem konnten Punkte erfasst werden, die mit traditionellen Methoden nur schwer bzw. gar nicht vermessen werden können (z.B. Brunnen, Kloake etc.). Im Zuge der Kartierung des Arbeitsgebietes sind zudem Modelle der einzelnen Gebäudestrukturen entstanden, die im weiteren Verlauf des Projektes „Archäologische Zone Köln/Jüdisches Museum“, insbesondere im späteren Museumsbereich zu Präsentations- und Lehrzwecken genutzt werden können.

8. Diskussion und Fazit

Die Untersuchung der Situation in der Archäologischen Zone Köln hat gezeigt, dass ein multidisziplinärer Ansatz in Verbindung mit quantitativen Methoden, archäoseismologischen Studien Aspekte hinzufügen kann, die über eine qualitative Beschreibung von Schäden und die darauf basierende subjektive Abschätzung der Schadensursache hinausgehen. Die dreidimensionale Kartierung des Arbeitsgebietes wurde genutzt, um die weiteren Untersuchungen auf ein möglichst breites Datenfundament zu stellen. Neben dem Nutzen für die naturwissenschaftlichen Untersuchungen konnten die dreidimensionalen Modelle zudem verwendet werden, um die archäologischen Arbeiten an den Befunden zu erleichtern und zu erweitern. Durch die Auswertung der topographischen Verhältnisse, der Untergrundverhältnisse und der regionalen tektonischen Situation wurden weitere Informationen gesammelt, welche die Argumentationskette bei der Beantwortung einer archäoseismologischen Fragestellung unterstützen. Auf dieser Grundlage können mögliche Schadensursachen objektiv beurteilt werden. Im Verlauf der Studie hat sich gezeigt, dass die archäologische Komplexität der untersuchten Lokalität die archäoseismologische Auswertung erschwert. Unsicherheiten in Bauabfolge, Datierung und archäologischer Interpretation werden bis zur Beurteilung einer möglichen Schadensursache weitergetragen. Diese Problematik wird an Lokalitäten, die nicht über eine derart komplexe, 2000jährige Baugeschichte wie im Kölner Fall verfügen, sicherlich nur in abgeschwächter Form auftreten. Zusammen mit dem komplizierten Aufbau des Baugrundes führte diese Situation zu notwendigen, starken Vereinfachungen in den numerischen Modellen. Bei der Modellerstellung wurden die Erkenntnisse der unterschiedlichen Untersuchungen als Grundlage für das vereinfachte Modell genutzt. Der tatsächliche Aufbau des Hanges kann jedoch nur durch massive Eingriffe in die archäologische Bausubstanz und den Untergrund freigelegt werden. Dies ist in dieser Form im Arbeitsgebiet nicht möglich. Die Gebäude in der Archäologischen Zone und die vorgefundenen Schäden wurden als Indikatoren für Bewegungen des Untergrundes genutzt. Die tatsächlichen Gebäudelasten wurden bei der Modellierung nicht berücksichtigt. Die Modellrechnungen können daher nur zur Abschätzung der Plausibilität von Schadensursachen beitragen. Es wurde untersucht ob die Grundvoraussetzungen für die entsprechenden Szenarien im Arbeitsgebiet gegeben sind. Im Folgenden werden die in dieser Arbeit eingegrenzten Schadensursachen bewertet.

Die detaillierte Auswertung der strukturellen Gebäudeschäden in der Archäologischen Zone Köln zeigt, dass sich keiner der gefundenen Schäden direkt auf Erschütterungen in Folge eines Erdbebens zurückführen lässt. Alle gefundenen Schäden deuten auf Bewegungen des Baugrundes. Als Auslöser für solche Bewegungen kommen sowohl Erschütterungen während eines Erdbebens, als auch Erosion im Untergrund in Frage. Die Schäden am Praetorium sowie ein Großteil der Schäden auf dem Rathausplatz sind ein klares Indiz für hangabwärtige Bewegungen des Untergrundes in Richtung Osten. Berechnungen auf Grundlage der Schadensauswertung haben gezeigt, dass selbst bei großen Strukturen wie dem Octogon des Praetoriums relativ geringe mobilisierte Materialvolumina ausreichen, um Schrägstellungen mit den vorgefundenen Beträgen zu erzeugen. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass die statische Hangstabilität sowie die Hangstabilität unter dynamischer Belastung gegeben ist. Als Grund für die Mobilisierung von Material im Untergrund kommen also nur Erosionsvorgänge (Hohlräume), Bodenverflüssigung und/oder Hangrutschung durch seismogene Belastung oder die Kombination aus einem durch Erosion geschwächten Hang und dynamischer Belastung in Frage.

Grundvoraussetzung für die Bildung von Hohlräumen in Lockersedimenten ist die Versickerung von Oberflächenwasser in Regionen mit erosionsanfälligen Sedimenten. Die Berechnungen der Auswirkungen von Niederschlagsereignissen zeigen, das Oberflächenwasser bei Bemessungsregenereignissen in den Bereich der im Arbeitsgebiet nachgewiesenen Fein-Mittelsandlinsen gelangen kann und somit grundsätzlich die Möglichkeit zum Materialabtransport besteht. Die archäologische Auswertung der römischen Befunde zeigt keinerlei Anzeichen für Reparatur, was sicherlich zu erwarten wäre, wenn die Schäden langsam z.B. durch Setzung des Baugrundes entstanden wären. Zudem wurde das Gebäude auch in poströmischer Zeit als repräsentativer Sitz der Administration weitergenutzt (Gechter und Schütte, 2000), was auf einen Nutzungszeitraum von ca. 350 Jahren für das Praetorium in der vierten Ausbauphase hindeutet. In diesem Zeitraum gab es keine Veranlassung für Reparaturarbeiten, bis das Gebäude Ende des 8. Jahrhunderts aufgegeben wurde. Aus archäologischer Sicht schließen Gechter und Schütte (2000) daher auf ein Schadensereignis zu dieser Zeit. Aufgrund der Schwere der Schäden am Praetorium kann ausgeschlossen werden, dass das Gebäude nach der Schädigung weiter genutzt werden konnte.

Betrachtet man also nur die römischen Befunde kommt für ein plötzliches Ereignis Ende des 8. Jahrhunderts durchaus ein Erdbeben in Frage. Die historische Erdbebenkataloge (Sieberg, 1940; van Gils und Leydecker, 1991; Leydecker, 2009) nennen für diesen Zeitraum allerdings keine schadensverursachenden Erdbeben für die Region Köln. Es werden für die Jahre 749, 801, 802/803, 803, 813, 823 und 829 zwar Erdbeben in der Region um Aachen erwähnt, es gibt jedoch lediglich für das Beben von 823 Hinweise auf Schäden in Aachen (Sieberg, 1940). Wenn ein Erdbeben mit einem Epizentrum im Aachener Raum zu Hangrutschungen oder Bodenverflüssigung in Köln geführt hat, so hätten die Bodenbewegungen im Epizentralgebiet, weitreichende Zerstörungen verursachen müssen. Solche Zerstörungen sind durch historische Quellen nicht zu belegen. Geht man hingegen von einem schadensverursachenden Erdbeben mit einem Epizentrum im Kölner Raum aus, hätten die Zerstörungen in Köln und Umgebung sicherlich ebenfalls in einer Größenordnung gelegen, die in historischen Quellen nicht unerwähnt geblieben wäre, zumal auch Erdbeben in dem in Frage kommenden Zeitraum erwähnt werden die wesentlich geringere Auswirkungen hatten.

Eine weitere Schwierigkeit der Erdbebenhypothese für das Ende des 8. Jahrhunderts besteht darin, dass im Bereich der Archäologischen Zone eine Vielzahl an Schadensbefunden an mittelalterlichen Konstruktionen vorliegt. Die römischen Befunde können, wenn man die historischen Quellen nicht berücksichtigt, mit der Erdbebenhypothese erklärt werden. Die Schäden an den mittelalterlichen Konstruktionen können jedoch nicht durch ein Ereignis am Ende des 8. Jahrhunderts verursacht worden sein. Die Neubebauung des Areals des Praetoriums zu dieser Zeit (Gechter und Schütte, 2000) belegt jedoch, dass eine Beschädigung des Praetoriums zu einem späteren Zeitpunkt, zusammen mit den mittelalterlichen Befunden, ausgeschlossen werden kann.

Die Annahme, dass mehrere Schadensbeben zunächst die römischen Befunde und zu einem späteren Zeitpunkt die mittelalterlichen Befunde geschädigt haben, scheint auf Grundlage der Gutenberg-Richter Beziehung für das Gebiet der nördlichen Rheinlande unwahrscheinlich.

Betrachtet man die Schadensbilder der römischen und der mittelalterlichen Befunde zeigt sich, dass sich die Schäden an mittelalterlichen Gebäuden wesentlich kleinräumiger auswirken, während das Schadensbild der römischen Strukturen ein einheitlicheres Bild über einen größeren räumlichen Bereich zeigt. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass es im Mittelalter keine der römischen Zeit vergleichbare, monumentale Architektur gab. Die

römischen Befunde liegen, mit Ausnahme der antiken Hypocaustanlage auf dem Rathausplatz, alle im Bereich des ehemaligen Rheinhangs, während die mittelalterlichen Befunde zwar in der Nähe der Hangkante, aber auf dem Plateau der Niederterrasse liegen. Für den Zeitraum der römischen Besiedelung liegen keine vergleichbaren Befunde an kleineren, weniger monumentalen Bauten für den Terrassenbereich vor. Trotz der Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Schäden an mittelalterlichen Gebäuden und der römischen Architektur, zeigen alle Schadensbefunde Gemeinsamkeiten. Die Schadensbilder beider Abschnitte sind ein Indiz für hangabwärtige und/oder vertikale Bewegungen im Untergrund und keiner der gefundenen Schäden lässt sich eindeutig nur einem seismogenen Ursprung zuordnen. Es liegen keine Schadenbefunde vor, die eine Schädigung durch direkte Erdbebenerschütterung fordern. Der Großteil der Schäden, unabhängig von der Datierung, legt Bewegungen im Untergrund des Gebietes nahe, die nicht zwangsläufig durch Einwirkung eines Erdbebens verursacht sein müssen. Selbst für die Schäden im Bereich des Abwasserkanals, für die eine plausible Erklärung durch seismogene Einwirkung möglich wäre, gibt es eine alternative Erklärung, welche die Schäden durch Einwirkung von Wasser auf die Konstruktion und die Sedimentfüllung erklären kann.

Der Nachweis von instabilen Sandlinsen im Untergrund des Arbeitsgebietes lässt eine von der Erdbebenhypothese abweichende Interpretation der Situation zu. Durch Erosionsvorgänge im Untergrund, deren Grundvoraussetzungen im Arbeitsgebiet gegeben sind, können Hohlräume unterschiedlicher Dimension entstanden sein. Diese Hohlräume können im Kleimaßstäblichen (mm–cm) zu einer Destabilisierung des Hanges an sich geführt haben und/oder im größeren Maßstab (dm–m) als Einzelstrukturen schadensverursachend gewesen sein. Studien haben gezeigt (u.a. Costa und di Prisco, 1999), dass solche Vorgänge oftmals in plötzlichen Schadensereignissen resultieren (Jones, 2004b). Die Erosionsvorgänge wirken zwar über einen längeren Zeitraum auf den Untergrund ein, ist jedoch ein gewisser Grad an Destabilisierung des Hanges oder des einzelnen Hohlraumes erreicht, kommt es zu einer plötzlichen Mobilisierung des Untergrundes oder zu einem Kollaps des Hohlraumes. Bei Erosionsvorgängen handelt es sich um kumulative Vorgänge, die vom Beginn der Erosion bis zum resultierenden Schadensereignis große Zeiträume umfassen können. Je nach Bebauungs- und Versiegelungssituation des Arbeitsgebietes können diese Vorgänge in verschiedenen Bereichen zu unterschiedlichen Zeitpunkten begonnen haben und zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu Schäden geführt haben. Es ist daher durchaus möglich, dass die komplexe Baugrundsituation zu Beschädigungen an der römischen Bausubstanz und zu einem späteren Zeitpunkt an den mittelalterlichen Gebäuden geführt hat. Der Größenmaßstab bei Erosionsvorgängen im Untergrund reicht von kleinen Sinklöchern (<1 m) bis hin zu Hangrutschungen mit großen Materialvolumina, so dass sowohl kleinräumige Strukturen als auch ganze Gebäudekomplexe betroffen sein können.

Die Untersuchungen in der Archäologischen Zone Köln haben gezeigt, dass ein seismogener Ursprung für die vorgefundenen Gebäudeschäden ein unwahrscheinliches Szenario ist, wenngleich es für die römischen Schadensbefunde nicht komplett ausgeschlossen werden kann. Betrachtet man jedoch das Gesamtschadensbild unter Berücksichtigung der Datierungen für die einzelnen Gebäude, scheint eine wiederholte Schädigung der Bausubstanz aus den unterschiedlichen Epochen durch erosionsbedingtes, plötzliches Baugrundversagen als durchaus wahrscheinlich.

Die jüngere Vergangenheit hat gezeigt, dass Hohlraumbildungen und Destabilisierungen im Untergrund von Köln zu massiven Folgen, selbst für moderne Gebäudestrukturen führen können. Der Einsturz des Kölner Stadtarchivs am 3.3.2009 mit den bekannten Auswirkungen

zeigt, das Sandvorkommen in den Sedimenten der Terrasse im Untergrund des Kölner Stadtgebietes Schwachstellen bilden, die im Fall des Stadtarchivs vermutlich durch anthropogen verursachte Wasserbewegungen mobilisiert wurden (KVB, 2011).

9. Literaturverzeichnis

Abellán, A., Jaboyedoff, M., Oppikofer, T. und Vilaplana, J.M. (2009). Detection of millimetric Deformation using a Terrestrial Laser Scanner: Experiment and Application to a rockfall event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**, 365-372.

Abellán, A., Vilaplana, J.M. und Martínez, J. (2006). Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed Rockfall Study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain). *Engineering Geology*, **88**, 136-148.

Acevedo Pardo, C., Sternberg, H., Wilhelm, J. und Schramm, T. (2009). Rekonstruktion von Exponaten der Ägyptischen Sammlung des Völkerkundemuseums Hamburg, in: Luhmann T. und Müller, C. (Eds), *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009*, 149 – 162.

Ahorner, L. (2001). Abschätzung der statistischen Wiederkehrperioden von starken Erdbeben im Gebiet von Köln aufgrund von geologisch-tektonischen Beobachtungen an aktiven Störungen. *Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, **2**, 2-11.

Ahorner, L. (1994). Fault-plane solutions and source parameters of the 1992 Roermond, the Netherlands, mainshock and its stronger aftershocks from regional seismic data. *Geologie en Mijnbouw*, **00**, 1-17.

Ahorner, L. (1993). Gemessene Bodenbeschleunigungen beim Roermonder Erdbeben am 13. April 1992. *Bauingenieur*, **68**, 201-205.

Ahorner, L. (1975). Present-day stress field and seismotectonic block movements along major fault zones in Central Europe. *Tectonophysics*, **29**, 233-249.

Ahorner, L., Murawski, H. und Schneider, G. (1970). Die Verbreitung von schadensverursachenden Erdbeben auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. Versuch einer seismologischen Regionalisierung. *Zeitschrift für Geophysik*, **36**, 313-343.

Alberts, B., Hager, H., Heide, G. und Hilden, H.D. (1988). Geologie am Niederrhein. Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld, 142 S.

Al-Kheder, S., Al-Shawabkeh, Y. und Haala, N. (2009). Developing a documentation system for desert palaces in Jordan using 3D laser scanning and digital photogrammetry. *Journal of Archaeological Science*, **36**, 537-546.

Ambraseys, N.N. (1996). Material for the Investigation of the Seismicity of Central Greece, in: Stiros, S. und Jones, R.E. (Eds.), *Archaeoseismology*, British School at Athens, Fitch Laboratory Occasional Paper, **7**, 23-36.

Ambraseys, N.N. (1988). Engineering Seismology. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **17**, 1-105.

Ammianus Marcellinus (ca. 391 veröffentlicht). *Res gestae*, **XV, V, 31**, über http://la.wikisource.org/wiki/Res_Gestae_Libri_XXXI (12.7.2011)

- Aßkamp, R. und Schäfer, C. (2008). Projekt Römerschiff. Nachbau und Erprobung für die Ausstellung "Imperium, Konflikt, Mythos 2000 Jahre Varusschlacht", Koehler Verlagsgesellschaft, Hamburg, 152 S.
- Baltrusch, E. (2002). Die Juden und das Römische Reich – Geschichte einer konfliktreichen Beziehung, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 223 S.
- Balzani, M., Santopuoli, N., Grieco, A. und Zaltron, N. (2004). Laser Scanner 3D Survey in Archaeological Field: The Forum of Pompeii. *Proceedings of the International Conference on Remote Sensing in Archaeology, Beijing, China, Oct. 18.-21. 2004*, 169-175.
- Barber, D., Mills, J. und Bryan, P. (2003). Towards a standard specification for Terrestrial Laser Scanning of cultural Heritage. *ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XXXIV-5/C15**, Antalya, Turkey, 619-624.
- Bates, K.T., Rarity, F., Manning, P.L., Hodgetts, D., Vila, B., Oms, O., Galobart, A. und Gawthorpe, R.L. (2008). High-resolution LIDAR and Photogrammetric Survey of the Fumanya Dinosaur Tracksides (Catalonia): Implications for the Conservation and Interpretation of Geological Heritage Sites. *Journal of the Geological Society London*, **165**, 115-127.
- Beraldin, J.-A., Picard, M., El-Hakim, S., Godin, G., Paquet, E., Peters, S., Rioux, M., Valzano, V. und Bandiera, A. (2004). Virtual heritage: The cases of the Byzantine Crypt of Santa Cristina and Temple C of Selinunte. *Proceedings of Tenth International Conference on Virtual Systems and Multimedia, Softopia Japan, Ogaki City, Gifu, Japan, 17.-19. November 2004*, IEEE Computer Society Washington, DC, USA.
- Besl, P.J. und McKay, N.D. (1992). A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **14**, 239-256.
- Blüthgen, J. und Weischet, W. (1980). Allgemeine Klimageographie. 3. Auflage, Walter de Gruyter, Berlin-New York, 887 S.
- Boehler, W. und Marbs, A. (2002). 3D scanning instruments. *Proceedings of the International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*, Korfu, Greece, 9-12.
- Boenigk, W. (2002). Pleistocene drainage pattern in the Lower Rhine Basin. *Netherlands Journal of Geosciences*, **81**, (2), 201-209.
- Boenigk, W. (1978). Gliederung der altquartären Ablagerungen in der Niederrheinischen Bucht. *Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen*, **28**, 135-212.
- Boenigk, W. und Frechen, M. (2006). The Pliocene and Quaternary Fluvial archives of the Rhine System. *Quaternary Science Reviews*, **25**, 550–574.
- Botschek, J., Krause, S., Abel, T. und Skowronek, A. (2002). Hydrological parameterization of piping in loess-rich soils in the Bergisches Land, Nordrhein-Westfalen, Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **165**, 506-510.

- Brinker, W. (1986). Überlegungen zur Hydrologie und Hydraulik der Eifelleitung, in: K. Grewe (Ed.), *Atlas der römischen Wasserleitungen nach Köln, Rheinische Ausgrabungen*, **26**, 235-247.
- Brenner, C. (2006). Aerial Laser Scanning. *International Summer School "Digital Recording and 3D Modeling"*, ISPRS Commission IV Special Interest Group "Technology Transfer Caravan", Aghios Nikolaos, Crete, Greece, 24.-29.4.2006, 69 S.
- Broser, J.-M. (2008). Terrestrisches Laserscanning – Anwendungen in Archäologie und Denkmalpflege, in: Luhmann T. und Müller, C. (Eds), *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008*, 256 – 263.
- Bryan, P. (2004). 3D Laserscanning – New Techniques of Observation. *Conservation Bulletin*, **45**, 6-8.
- Buckley, S.J., Howell, J.A., Enge, H.D. und Kurz, T.H. (2008). Terrestrial Laser Scanning in Geology: Data Aquisition, Processing and Accuracy Considerations. *Journal of the Geological Society London*, **165**, 625-638.
- Busch, K. F. und Luckner, L. (1974): Geohydraulik für Studium und Praxis. Enke Verlag, Stuttgart. S. 126.
- Camelbeeck, T. und Meghraoui, M. (1998). Geological and geophysical evidence for large palaeoearthquakes with surface faulting in the Roer Graben (Northwest Europe). *Geophysical Journal International*, **132**, 347-362.
- Caputo, R., Hinzen, K.-G., Liberatore, D., Schreiber, S., Helly, B. und Tziafalias, A. (2010). Quantitative archaeoseismological investigation of the Great Theatre of Larissa, Greece. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **9**, 347-366.
- Charlton, M.E., Coveney, S.J. und McCarthy, T. (2009). Issues in Laserscanning, in: J. Shan und C. K. Toth (Eds.), *Topographic Laser Ranging and Scanning, Principles and Processing*, CRC Press 2009, Boca Raton, USA, 35-48.
- Cignoni, P. und Scopigno, R. (2008). Sampled 3D Models for CH Applications: A Viable and Enabling New Medium or Just a Technological Exercise? *Journal on Computing and Cultural Heritage*, **1**, (1), Artikel Nr.2.
- Crosta, G. und di Prisco, C. (1999). On slope instability induced by seepage erosion. *Canadian Geotechnical Journal*, **36**, 1056-1073.
- Dewey, J.F., Pitman, W., Ryan, W. und Bonin, J. (1973). Plate tectonics and the evolution of the Alpine system. *Geological Society of America Bulletin*, **84**, 3137-3180.
- Doppelfeld, O. (1979). Vom unterirdischen Köln. Nach dem Tode herausgegeben von G. Biegel, Greven Verlag, Köln, 208 S.
- Doppelfeld, O. (1973). Vom römischen Praetorium zur frankischen Königspfalz, in: P. Fuchs (Ed.), *Das Rathaus zu Köln*, Greven Verlag, Köln 22-40.

- Doppelfeld, O. (1959). Die Ausgrabungen im Kölner Judenviertel, in: Asaria, Z. (Ed.), *Die Juden in Köln von den ältesten Zeiten bis zur Gegenwart*, J.P. Bachem, Köln, 71-145.
- Doppelfeld, O. (1958). Das Praetorium unter dem Kölner Rathaus, in: W. Krämer (Ed.), *Neue Ausgrabungen in Deutschland*, Gebr. Mann Verlag, Berlin, 313-321.
- Doppelfeld, O. (1957). Ein spätrömisches Oktogon aus Köln, *Vjesnik za arheologiju i historiju dalmatinsku* **56/59**, 211-223.
- Doppelfeld, O. (1956). Römische Großbauten unter dem Kölner Rathaus. Vorbericht über die Rathausgrabung des Jahres 1953, *Germania* **34**, 83-99.
- Drap, P., Sgrenzaroli, M., Canciani, M., Cannata, G. und Seinturier, J. (2003). Laserscanning and Close Range Photogrammetry: Towards a Single Measuring Tool dedicated to Architecture and Archaeology, *Proceedings of the CIPA XIXth International Symposium, Antalya, Turkey, 30.9.-4.10.2003*.
- Du, J.-C. und Teng, H.-C. (2007). 3D Laser Scanning and GPS Technology for Landslide Earthwork Volume Estimation. *Automation in Construction*, **16**, 657-663.
- Dunning, S.A., Massey, C.L. und Rosser, N.J. (2009). Structural and Geomorphological Features of Landslides in the Bhutan Himalaya derived from Terrestrial Laser Scanning. *Geomorphology*, **103**, 17-29.
- Dziewonski, A.M. und Anderson, D.L. (1981). Preliminary reference Earth Model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **25**, 297-356.
- El-Hakim, S.F., Fryer, J. und Picard, M. (2004). Modelling and Visualization of Aboriginal Rock Art in the Baiame Cave. In *Proceedings of the XXth Congress of ISPRS, IAPRS* **35**, 990-995.
- Engelkemeir, R.M. und Khan, S.D. (2008). Lidar Mapping of Faults in Houston, Texas, USA. *Geosphere*, **4**, 170-182.
- Esser, R. (2011). Geotechnische Untersuchung von Sandlinsen in der Archäologischen Zone Köln, Bachelorarbeit, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität zu Köln, 67 S.
- Evans, A. (1928). The Palace of Minos, Teil 2, Macmillan, London, 844 S.
- Fäh, D., Steimen, S., Oprsal, I., Ripperger, J., Woessner, J., Schatzmann, R., Kaestli, P., Spottke, I. und Huggenberger, P. (2006). The earthquake of 250 A.D. in Augusta Raurica, A real event with a 3D site-effect? *Journal of Seismology*, **10**, 459-477.
- Farifteh, J. und Soeters, R. (1999). Factors underlying piping in the Basilicata region, southern Italy. *Geomorphology*, **26**, 239-251.
- Fleischer, C., Hinzen, K.-G. und Schreiber, S. (2010). Laserscanning eines römischen Brunnens in der Archäologischen Zone Köln. *Allgemeine Vermessungs Nachrichten*, **5/2010**, 176-181.

- Frechen, J., und van den Boom, G. (1959). Die sedimentpetrographische Horizontierung der pleistozänen Terrassenschotter im Mittelh Rheingebiet. *Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen*, **4**, 89 – 125.
- Fröhlich, C. und Mettenleiter, M. (2004). Terrestrial Laser Scanning – New Perspectives in 3D Surveying. *Proceedings of ISPRS working group VIII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*, Freiburg, Germany, 7-13.
- Fryer, J., Chandler, J.H. und El-Hakim, S.F. (2005). Recording and Modelling an Aboriginal Cave Painting: With or Without Laser Scanning? *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XXXVI**, Part 5, W17.
- Galadini, F., Stiros, S. und Hinzen, K.-G. (2006). Archaeoseismology: Methodological issues and procedure. *Journal of Seismology*, **10** (4), 395-414.
- Gechter, M. und Schütte, S. (2000). Ursprung und Voraussetzungen des mittelalterlichen Rathauses und seiner Umgebung, in: Geis, W.und Krings, U. (Eds.), *Stadtspuren - Denkmaeler in Koeln. Koeln: Das gotische Rathaus und seine historische Umgebung*, **26**, J.P. Bachem Verlag, Köln, 69 – 195.
- González-Aguilera, D., Gómez-Lahoz, J und Sánchez, J. (2008). A New Approach for Structural Monitoring of Large Dams with a Three-Dimensional Laser Scanner. *Sensors*, **8**, 5866-5883.
- Grabert, H. (1998). Abriß der Geologie von Nordrhein-Westfalen. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 351 S.
- Grewe, K. (1986). Einleitung, in: Grewe, K. (Ed.), *Atlas der römischen Wasserleitungen nach Köln, Rheinische Ausgrabungen*, **26**, Rheinland-Verlag, Köln, XI-XIV.
- Grünhagen, H. (1981). Zur Verbreitung der Trachyttuffe des Siebengebirges. *Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen*, **29**, 59-72.
- Hancock, G.R., Crawter, D., Fityus, S.G., Chandler, J. und Wells, T. (2008). The Measurement and Modelling of Rill Erosion at Angle of Repose Slopes in Mine Spoil. *Earth Surface Processes and Landforms*, **32**, 66-74.
- Hardin, B.O. und Drnevich, V.P. (1972). Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **98** (6), 603-624.
- Haugerud, R.A., Harding, D.J., Johnson, S.Y., Harless, J.L. und Weaver, C.S. (2003). High-Resolution Lidar Topography of the Puget Lowland, Washington – A Bonanza for Earth Science. *GSA Today*, **13**, 4-10.
- Heinrichs, J. (1996). Civitas ubiorum: Historisch-numismatische Studien zur Geschichte der Ubier und ihres Gebiets, Habilitationsschrift, Universität zu Köln, 379 S.

- Hellenkemper, H. (1986). Wasserbedarf, Wasserverteilung und Entsorgung der Colonia Claudia Ara Agrippinensium, in: Grewe, K. (Ed.), *Atlas der römischen Wasserleitungen nach Köln, Rheinische Ausgrabungen*, **26**, Rheinland Verlag, Köln, 193-214.
- Hellenkemper, H. (1975). Oppidum und Legionslager in Köln. Überlegungen zur frühromischen Topographie. *Kölner Jahrbuch für Vor- und Frühgeschichte*, **13**, 59-64.
- Heritage, G. L. und Large, A. R. G. (2009). Principles of 3D Laser Scanning, in: Heritage, G.L. und Large, A. R. G. (Eds) *Laser Scanning for the Environmental Sciences*, Wiley Blackwell Publishing, Chicester, UK, 21-34.
- Heritage, G.L. und Hetherington, D. (2007). Towards a Protocol for Laser Scanning in fluvial Geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, **32**, 66-74.
- Hinzen, K.-G. (2010). Earthquake, Archaeoseismology, in: GUPTA, H.K. (Ed.), *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, Springer, Heidelberg, DOI 10.1007/978-90-481-8702-7.
- Hinzen, K.-G. (2009). Simulation of toppling columns in archaeoseismology. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99** (5), 2855-2875.
- Hinzen, K.-G. (2005a). Ground motion parameters of the July 22, 2002 ML 4.9 Alsdorf (Germany) earthquake. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, **46** (4), 303-318.
- Hinzen, K.-G. (2005b). The Use of Engineering Seismological Models to Interpret Archaeoseismological Findings in Tolbiacum, Germany: A Case Study. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**, 521-539.
- Hinzen, K.-G. und Weiner, J. (2009). Testing a Seismic Scenario for the Damage of the Neolithic Wooden Well of Erkelenz-Kueckhoven, Germany. *Geological Society, London. Special Publications*, **316**, 189-205.
- Hinzen, K.-G. und Reamer, S.K. (2007). Seismicity, seismotectonics and seismic hazard in the northern Rhine area, in: Stein, S. und Mazotti, S. (Eds.), *Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard and Policy Issues*, *Geological Society of America Special Paper*, **425**, 225-242.
- Hinzen, K.-G. und Schütte, S. (2003). Evidence for Earthquake Damage on Roman Buildings in Cologne, Germany. *Seismological Research Letters*, **74** (2), 124-140.
- Hinzen, K.-G., Fleischer, C., Reamer, S.K., Schreiber, S., Schütte, S. und Yerli, B. (2011a). Quantitative Methods in Archaeoseismology. *Quaternary International*, **242** (1), 31-41.
- Hinzen, K.-G., Kehmeier, H. und Schreiber, S. (2011b). Earthquake Versus Rockfall, Testing Two Damaging Scenarios for a Roman Mausoleum. *Seismological Research Letters*, **82** (2), 334.
- Hinzen, K.-G., Rosellen, S. und Schreiber, S. (2011c). Does a higher resolution Laserscan Model reveal further Evidences on the Damage Process of the Roman Theater in Pinara, Turkey? *Journal of Cultural Heritage*, eingereicht.

- Hinzen, K.-G., Schreiber, S. und Yerli, B. (2010). The Lycian Sarcophagus of Arttumpara, Pinara, Turkey: Testing Seismogenic and Anthropogenic Damage Scenarios. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100** (6), 3148–3164.
- Holthausen, D. (1994). Reliefentwicklung und Bodenkontamination der Kölner Altstadt seit der Römerzeit. Diplomarbeit, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität zu Köln, 136 S.
- Höhlbaum, K. (1887). Das Buch Weinsberg. *Kölner Denkwürdigkeiten aus dem 16. Jahrhundert*, **II**, 443 S.
- Hunter, G., Pinkerton, H., Airey, R. und Calvari, S. (2003). The application of a long-range laser scanner for monitoring volcanic activity on Mount Etna. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **123**, 203–210.
- Hutchings, L.J. (1991). “Prediction” of strong ground motion for the 1989 Loma Prieta earthquake using Empirical Green’s functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **81** (5), 1813–1837.
- Jones, J.A.A. (2004a). Pipe and piping in: Goudie, A.S. (Ed.), *Encyclopedia of Geomorphology*. Routledge, London-New York, 784–788.
- Jones, J.A.A. (2004b). Implications of natural soil piping for basin management in Upland Britain. *Land Degradation and Development*, **15**, 325–349.
- Jones, R.E. und Stiros, S.C. (2000). The advent of archaeoseismology in the Mediterranean, in: McGuire, W.J., Griffiths, D.R., Hancock, P.L. und Stewart, I.S. (Eds.), *The Archaeology of Geological Catastrophes*, Geological Society Special Publication, **171**, The Geological Society, London, 25–32.
- Kamai, R. und Hatzor, Y.H. (2008). Numerical analysis of block stone displacements in ancient masonry structures; a new method to estimate historic groundmotions. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **32** (11), 1321–1340.
- Karcz, I. und Kafri, U. (1978). Evaluation of supposed Archaeoseismic Damage in Israel. *Journal of Archaeological Science*, **5**, 237–253.
- Kawase, H. (2003). Site Effects on Strong Ground Motions, in: Lee, W.H.K. und Kanamori, H. (Eds.), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part B*, Academic Press, London, 1013–1030.
- Kern, F. (2003). Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3DLaserscanner-Daten, Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen der technischen Universität Carolo-Wilhemina zu Braunschweig, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig Nr. **19**, 152 S.
- Kersten, T., Tilsner, A., Jaquemotte, I. und Sieh, W. (2010). 3D-Erfassung und Modellierung des Bismarck-Denkmal durch terrestrisches Laserscanning zur Integration in das Hamburger Stadtmodell. *Allgemeine Vermessungs Nachrichten*, **5/2010**, 163–169.

Kemna, H.A. (2008). A Revised Stratigraphy for the Pliocene and Lower Pleistocene Deposits of the Lower Rhine Embayment. *Netherlands Journal of Geosciences*, **87** (1), 91-105.

Kemna, H.A. (2005). Pliocene and Lower Pleistocene Stratigraphy in the Lower Rhine Embayment. *Kölner Forum für Geologie und Paläontologie*, **14**, 121 S.

Kim, H., Arrowsmith, J. R., Crosby, C.J., Jaeger-Frank, E., Nandigam, V., Memon, A., Conner, J., Badden, S.B. und Baru, C. (2006). An Efficient Implementation of a Local Binning Algorithm for Digital Elevation Model Generation of LiDAR/ALSM Dataset. *Eos Transactions AGU*, **87**(52), Fall Meet. Suppl., Abstract G53C-0921, 2006.

Klostermann, J. (1992). Das Quartär der Niederrheinischen Bucht.- Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld, 200 S.

Köhler, H. (1941). Köln. Natürliche Grundlagen des Werdens einer Großstadt. Inaugural Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität zu Köln, *Zur Wirtschaftsgeographie des deutschen Westens* ; **7**, Volk-und-Reich-Verlag, Berlin, 185 S.

Kramer, S.L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering., Prentice Hall, Upper Saddle River, USA, 652 S.

Krumsiek, K. (1997). Das Rheinprofil – Schichtenfolge, sedimentäre und tektonische Gefüge sowie Plattentektonische Diskussion, *Terra Nostra*, **97/3**, 25-49.

Kübler S., Friedrich A. und Strecker M. (2010). Paleoseismic evidence for seismogenic faulting in the epicentral area of the 1755/56 Düren earthquake series, Lower Rhine Embayment, NW Germany; *EGU Annual Meeting 2010*, Wien, Österreich.

Lambers, K., Eisenbeiss, H., Sauerbier, M., Kupferschmidt, D., Gaisecker, T., Sotoodeh, S. und Hanusch, T. (2007). Combining Photogrammetry and Laser Scanning for the Recording and Modelling of the Late Intermediate Period Site of Pinchango Alto, Palpa, Peru. *Journal of Archaeological Science*, **34**, 1702-1712.

Lang, H.-J., Huder, J. und Amann, P. (2003). Bodenmechanik und Grundbau: Das Verhalten von Böden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte, Springer Verlag, Berlin, 317 S.

Large, A. R. G. und Heritage, G. L. (2009). Laser Scanning - Evolution of the Discipline, in: *Laser Scanning for the Environmental Sciences*, Wiley Blackwell Publishing, Chichester, UK, 1-20.

Lerma, J.L., Navarro, S., CabrelleS, M. und Villaverde, V. (2010). Terrestrial Laser Scanning and Close Range Photogrammetry for 3D Archaeological Documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a Case Study, *Journal of Archaeological Science*, **37**, 499-507.

Lerma, J.L., Van Genechten, B., Heine, E. und Santana Quintero, M. (2008). 3D RiskMapping. Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning. *Training Material Based on Practical Applications*. Universidad Politecnica de Valencia, 261 S.

- Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., Ginzton, M., Anderson, S., Davis, J., Ginsberg, J., Shade, J. und Fulk, D. (2000). The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, New Orleans, USA, 23-28.7.2000, 131-144.
- Madariaga, R. (2009). Seismic Source Theory, in: Kanamori, H. (Ed.), *Earthquake Seismology: Treatise on Geophysics*, Band 4, Elsevier Scientific Publishing, San Diego, USA, 59-82.
- Marco, S. (2008). Recognition of earthquake-related damage in archaeological sites: Examples from the Dead Sea fault zone. *Tectonophysics*, **453**, 148-156.
- Leydecker, G. (2009). Erdbebenkatalog fuer die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 - 2007. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Maiman, T. (1960). Stimulated Optical Radiation in Ruby. *Nature*, **187**, 493–494.
- Meidow, H. (1995). Rekonstruktion und Reinterpretation von historischen Erdbeben in den nördlichen Rheinlanden unter Berücksichtigung der Erfahrungen bei dem Erdbeben von Roermond am 13. April 1992. Inaugural Dissertation, Universität zu Köln, 305 S.
- Meskouris, K., Hinzen, K.-G., Butenweg, C. und Mistler, M. (2007). Bauwerke und Erdbeben: Grundlagen – Anwendung – Beispiele. 2. Auflage, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 493 S.
- Nagihara, S., Mulligan, K.R. und Xiong, W. (2004). Use of a three-dimensional Laser Scanner to digitally capture the Topography of Sand Dunes in high spatial Resolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, **29**, 391-398.
- Neubauer, W., Doneus, M., Studnicka, N. und Riegl, J. (2005). Combined High Resolution Laser Scanning and Photogrammetrical Documentation of the Pyramids at Giza, in: DEQUAL, S. (Ed.), *Proceedings of the XXth International Symposium CIPA, Torino Italy, 2005, The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI-5/C34/1, 2005, 470-475.
- Nikonov, A.A. (1988). On the Methodology of Archaeoseismic Research into Historical Monuments, in: Marinos, P.G. und Koukis, G.C. (Eds.), *The Engineering Geology of ancient Works, Monuments and historical Sites, Preservation and Protection*. Proc. Int. Symp. Greek National Group of IAEG, Athens Sept. 19–23 1988. Rotterdam, 1315–1320.
- Oncken, O., von Winterfeld, C. und Dittmar, U. (1999). Accretion of a rifted passive margin: The Late Paleozoic Rhenohercynian fold and thrust belt (Middle European Varicides). *Tectonics*, **18** (1), 75-91.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Blikra, L., Derron, M.-H. und Metzger, R. (2009). Characterization and Monitoring of the Åknes Rockslide using Terrestrial Laser Scanning. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**, 1003-1019.

- Owoputi, L.O. und Stolte, W.J. (2001). The role of seepage in erodibility. *Hydrological Processes*, **15**, 13–22.
- Pearce, M.A., Jones, R.R., Smith, S.A.F., McCaffrey, K.J.W. und Clegg, P. (2006). Numerical Analysis of Fold Curvature using data acquired by High-Precision GPS. *Journal of Structural Geology*, **28**, 1640-1646.
- Petrie, G. und C. K. Toth (2009). Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning, in: J. Shan und C. K. Toth (Eds.), *Topographic Laser Ranging and Scanning, Principles and Processing*, CRC Press 2009, Boca Raton, USA, 1-28.
- Petzold, B., Reiss, P. und Stössel, W. (1999). Laser Scanning - Surveying and Mapping Agencies are using a New Technique for the Derivation of Digital Terrain Models. *ISPRS Journal of Photogrammetry*, **54**, 95-104.
- Pfeifer, N. und Briese, C. (2007). Laser scanning – Principles and Applications. *Geo-Sibir, III. International Scientific Conference*, 25.-27.4.2007, Nowosibirsk, Russland, 93–112.
- Precht, G. (2008). Der Apsidialbau im Praetorium der Colonia Claudia Ara Agrippinensium/ Köln. *Kölner Jahrbuch*, **41**, 287-337.
- Precht, G. (1973). Baugeschichtliche Untersuchungen zum römischen Praetorium in Köln, *Rheinische Ausgrabungen*, **14**, 120 S.
- Precht, G. (1971). Die Ausgrabungen um den Kölner Dom – Vorbericht über die Untersuchungen 1969/1970. *Kölner Jahrbuch für Vor- und Frühgeschichte*, **12**, 52-64.
- Price, W.F. und Uren, J. (1989). *Laser Surveying*, Van Nostrand Reinhold (International), London, 256 S.
- Prinz, H. und Strauß, R. (2006). *Abriss der Ingenieurgeologie*. 4. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 671 S.
- Psycharis, I.N. (2007). A probe into the seismic history of Athens, Greece from the current state of a classical monument. *Earthquake Spectra*, **23**, 393-415.
- Psycharis, I.N., Lemos, J.V., Papastamatiou, D.Y., Zambas, C. und Papantonopoulos, C. (2003). Numerical study of the seismic behaviour of a part of the Parthenon Pronaos. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **32** (13), 2063-2084.
- Rapp, G., (1986). Assessing Archaeological Evidence for Seismic Catastrophes. *Geoarchaeology*, **1**, 365–379.
- Reamer, S.K. und Hinzen, K.-G. (2004). An Earthquake Catalog for the Northern Rhine Area, Central Europe (1975-2002). *Seismological Research Letters*, **75** (6), 713-725.
- Richter, C.F. (1935). An instrumental Earthquake Magnitude Scale, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **25** (1), 1-32.

- Rosellen, S. (2011). Archäoseismologische Untersuchung des römischen Theaters von Pınara, Türkei. Diplomarbeit, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität zu Köln, 82 S.
- Rosser, N.J., Petley, D.N., Lim, M., Dunning, S.A. und Allison, R.J. (2005). Terrestrial Laser Scanning for Monitoring the Process of Hard Rock Coastal Cliff Erosion. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, **38**, 363-375.
- Ruland, M. R. (1926). Die Terrassen am Rande der niederrheinischen Bucht zwischen Sieg und Wupper. *Verhandlungen des Naturhistorischen Vereins der Preussischen Rheinlande und Westfalens*, **82**, 395–455.
- Rüther, H., Chazan, M., Schroeder, R., Neeser, R., Held, C., Walker, S.J., Matmon, A. und Horwitz, L.K. (2009). Laser Scanning for Conservation and Research of African Cultural Heritage Sites: The Case Study of Wonderwerk Cave, South Africa. *Journal of Archaeological Science*, **36**, 1847-1856.
- Schäfer, A., Utescher, T, Klett, M. und Valdivia-Manchego, M. (2005). The Cenozoic Lower Rhine Basin–rifting, sedimentation, and cyclic stratigraphy. *International Journal of Earth Science*, **94**, 621-639.
- Schäfer, F.F. (2004). Das Praetorium in Köln und weitere Statthalterpaläste im Imperium Romanum – Eine baugeschichtliche Untersuchung und eine vergleichende Studie zu Typus und Funktion. Inaugural Dissertation, Philosophische Fakultät der Universität zu Köln, 522 S.
- Schliemann, H. (1881). Autobiographie des Verfassers und Geschichte seiner Arbeiten in Troja, in: *Ilios. Stadt und Land der Trojaner, Forschungen und Entdeckungen in der Troas und besonders auf der Baustelle von Troja*, Leipzig, 1-78.
- Schreiber, S., Hinzen, K.-G., Fleischer, C. und Schütte, S. (2011). Excavation Parallel Laser Scanning of a Medieval Cesspit in the Archaeological Zone Cologne, Germany. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, eingereicht.
- Schulze, R und Steuernagel, C. (1895). Colonia Agrippinensis. *Bonner Jahrbücher*, **98**, 144 S.
- Schütte, S. (1986). Brunnen und Kloaken auf innerstädtischen Grundstücken im ausgehenden Hoch- und Spätmittelalter. *Zeitschrift für Archäologie des Mittelalters*, **4/1986**, 237-255.
- Schütte, S. und Gechter, M. (2011). Köln Archäologische Zone/Jüdisches Museum. Von der Ausgrabung zum Museum – Kölner Archäologie zwischen Rathaus und Praetorium, Ergebnisse und Materialien 2006 – 2011. Stadt Köln, Köln, 227 S.
- Schütte, S. und Gechter, M. (1999). Stephan Broelmann und die Folgen. *Kölner Museums Bulletin*, **1/1999**, 4-26.
- Seed, H.B. und Idriss, I.M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis. *Report EERC 70-10*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 37 S.

- Sequeira, V., Ng, K., Wolfart, E., Gonçalves, J.G.M. und Hogg, D. (1999). Automated Reconstruction of 3D Models from Real Environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry*, **54**, 1-22.
- Sgrenzaroli, M. und Wolfart, E. (2002). Accurate Texture-Mapped 3D models for Documentation, Surveying and Presentation Purposes, *CIPA WG 6 International Workshop on Scanning For Cultural Heritage Recording*, 1.-2.9.2002, Corfu, Greece.
- Sieberg, A. (1940). Beitrage zum Erdbebenkatalog Deutschlands und angrenzender Gebiete für die Jahre 58 bis 1799. *Mitteilungen des Deutschen Reichs-Erdbebendienstes*, Heft **2**, Berlin, 111 S.
- Simmer, K. (1994). Grundbau: Bodenmechanik und erdstatische Berechnung. Teubner Verlag, Stuttgart, 428 S.
- Stadt Köln, Amt für Stadtentwicklung und Statistik (2010). Statistisches Jahrbuch Köln 2010, 88. Jahrgang. *Kölner Statistische Nachrichten*, **5/2010**, 246 S.
- Staiger, R. (2003). Terrestrial Laser Scanning - Technology, Systems and Application. *Proceedings of 2nd FIG Regional Conference*, 2.-5.12.2003, Marrakech, Marokko, 10 S.
- Steinbuch R. (1998). Finite Elemente – Ein Einstieg, Springer Verlag, Berlin, 266 S.
- Stück, H., Forgó, L.Z., Rüdrieh, J., Siegesmund, S. und Török, Á. (2008). The behaviour of consolidated volcanic tuffs: weathering mechanisms under simulated laboratory conditions. *Environmental Geology*, **56**, 699-713.
- Studer, J.A. und Koller, M.G. (1997). Bodendynamik: Grundlagen, Kennziffern, Probleme. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 262 S.
- Stuiver, M. und Polach, H.A. (1977). Discussion: Reporting of ^{14}C data. *Radiocarbon*, **19** (3), 355-363.
- Tacitus, C. (um 120 n. Chr.). Annales XII, Translated by Alfred John Church and William Jackson Brodribb, via gopher://gopher.vt.edu:10010/10/33, Zugriff am 21.10.2011.
- Thiel, K.-H. und Wehr, A. (2004). Performance Capabilities of Laser Scanners - an Overview and Measurement Principle Analysis. *Proceedings of ISPRS working group VIII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"* Freiburg, Germany, 3.-6.10.2004, 14-18.
- Thoste, V. (1974). Die Niederterrassen des Rheins vom Neuwieder Becken bis in die Niederrheinische Bucht. Inaugural Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität zu Köln, 115 S.
- van Eyll, K. (1991). Köln von der französischen Besetzung bis zum Ende des Ersten Weltkriegs (1794 bis 1918), in: Fuchs, P. (Ed.): *Chronik zur Geschichte der Stadt Köln*, **2**, 110-133.
- van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, **44**, 892-898.

- van Gils, J.M. und Leydecker, G. (1991). Catalogue of European earthquakes with intensities higher than 4. *Commission of the European Communities - nuclear science and technology*, 353 S.
- Vanneste, K. und Verbeeck, K. (2001). Detailed Palaeoseismic Investigation of the Rurand Fault in Hambach Trench, Germany. *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, **18**, 153-156.
- Vanneste, K., Mees, F. und Verbeeck, K. (2008). Thin Section Analysis as a Tool to Aid Identification of Palaeoearthquakes on the, slow, active Geleen Fault, Roer Valley Graben. *Tectonophysics*, **453**, 94-109.
- Vanneste, K., Verbeeck, K., Camelbeeck, T., Paulissen, E., Meghraoui, M., Renardy, F., Jongmans, D. und Frechen, M. (2001). Surface Rupturing History of the Bree Fault Scarp, Roer Valley Graben; Results from four Years of Palaeoseismological Investigation. *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, **18**, 147-152.
- Verachtert, E., van den Eeckhaut, M., Poesen, J. und Deckers, J. (2009). Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess-derived soils: A case study from central Belgium. *Geomorphology*, **118**, 339–348.
- Vežočnik, R., Ambrožič, T., Sterle, O., Bilban, G., Pfeifer, N. und Stopar, B. (2009). Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring. *Sensors*, **9**, 9873-9895.
- Vogel, H. (1974). Gerthsen, Kneser, Vogel – Physik, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 12. Aufl., 914 S.
- Vozikis, G., Haring, A., Vozikis, E. und Kraus, K. (2004). Laser Scanning: A New method for Recording and Documentation in Archaeology, in: *Proceedings of FIG Working Week 2004*, Athens, Greece, 22.-27.5.2004.
- Vucetic, M und Dobry, M. (1991). Effect on soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **117**, **1**, 89-107.
- Walter, R. (1992). Geologie von Mitteleuropa. 5. Auflage. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 561 S.
- Wang, R. (1999). A Simple Orthonormalization Method for Stable and Efficient Computation of Green's Functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89** (3), 733-741.
- Weber, B. (2007). Bodenverstärkung in der südlichen Niederrheinischen Bucht. Inaugural Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität zu Köln, 142 S.
- Wegner, M. (2010). Berechnung synthetischer Seismogramme für Erdbeben in der Kölner Bucht. Diplomarbeit, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität zu Köln, 117 S.

- Wiatr, T., Fernandez-Steeger, T. und Reicherter, K. (2009). Untersuchung von Massenbewegungen und Störungsflächen mit terrestrischem Laserscanning, in: Luhmann T. und Müller, C. (Eds), *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009*, 118 – 126.
- Wiosna, I. (2010). Untersuchung zum Verhalten der Rheinuferböschung im Römischen Köln bei seismischer Belastung. Diplomarbeit, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität zu Köln, 94 S.
- Wolff, G. (2000). Das Römisch-Germanische Köln – Führer zu Museum und Stadt. J.P. Bachem Verlag, Köln, 312 S.
- Wunstorff, W., und Fliegel, G. (1910). Die Geologie des Niederrheinischen Tieflandes. *Abhandlungen der königlich-preußischen geologischen Landesanstalt*, **67**, 172 S.
- Yerli, B., Schreiber, S. und Hinzen, K.-G. (2011). Seismotectonic background for archaeoseismologic studies in the Esen Basin, SW Turkey. *Natural Hazards*, eingereicht.
- Youd, T.L. (2003). Liquefaction Mechanisms and Induced Ground Failure, in: Lee, W.H.K. und Kanamori, H. (Eds.), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part B*, Academic Press, London, 1159-1173.
- Youd, T.L. (1998). Screening guide for rapid assessment of liquefaction hazard at highway bridge sites. *Technical Report MCEER-98-0005*, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 58 S.
- Youngs, R. R., und Coppersmith, K. J. (1985). Implication of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard assessment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **75**, 939-964.
- Ziegler, P.A. (1992): Geologic Atlas of Western and Central Europe, 2. Auflage. *Geological Society of London/ Shell Internationale Petroleum Maatschappij*, Den Haag, Niederlande, 256, S.

10. Daten und Ressourcen

KARTEN

Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen (1986). Ingenieurgeologische Karte 1:25000, Blatt 5007 Köln, Geologisches Landesamt NRW, Krefeld.

NORMEN

DIN 18130-1 (05/1998). Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes. Teil 1: Laborversuche

DIN 18196 (3/2007). Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für Bautechnische Zwecke.

DIN 60825-1 (05/2008). Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen.

KTA 2201.2 (6/2000). Sicherheitstechnische Regel des KTA: Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil 2: Baugrund.

GUTACHTEN

Erdbaulaboratorium Essen (1998). Nord-Süd-Stadtbahn Köln – Baugrunduntersuchung 1998.- Bearbeiter: Kowalewski, Ehl.

Erdbaulaboratorium Essen (2002). Nord-Süd-Stadtbahn Köln – Baugrunduntersuchung 2002.- Bearbeiter: Ehl.

Erdbaulaboratorium Essen (2005). Nord-Süd-Stadtbahn Köln – Verflechtungsstrecke Bechergasse – LV 2010 – Ergänzende Baugrunduntersuchung während der Bauzeit durch Bohrungen, Rammsondierungen und Rammkernsondierungen.- Bearbeiter: Könermann, Hammacher, Estermann.

GFM Umwelttechnik (2008). Baugrundgutachten im Bereich des Historischen Rathauses in Köln, Alter Markt.

Institut für Geotechnik Offer (2000). Generalisierung Rathaus Spanischer Bau – Überdachung des Innenhofs – Gutachten.

Kölner Verkehrs-Betriebe AG (2011). Sachstandsbericht Gleiswechsel Waidmarkt, Stand: 02/2011.

Tillmann's & Partner GmbH (2009). Geotechnische Untersuchungen im Bereich des Historischen Rathauses in Köln, Alter Markt, zur Beurteilung des Baugrundes im Zusammenhang mit dem Bau der U-Bahn.- Bearbeiter: Wagner, Fischer.

HANDBÜCHER UND DOKUMENTATIONEN

FARO Europe GmbH & Co. KG (2005). FARO Laserscanner LS - Recording reality's fingerprint.

FARO Scanner Production GmbH (2008). Faro Scene 4.5 User's Manual.

FARO Scanner Production GmbH (2009). Faro Scene 4.6 User's Manual.

FARO Scanner Production GmbH (2010). Faro Scene 4.7 User's Manual.

FARO Scanner Production GmbH (2008). FARO Photon Laser Scanner 20/80 Benutzerhandbuch.

GEO-SLOPE International Ltd. (2007): SEEPAGE/W Engineering Book - Seepage Modeling with SEEPAGE/W 2007.- 2. Auflage; Calgary, Alberta, Canada, 300 S.

GEO-SLOPE International Ltd. (2008): QUAKE/W Engineering Book - Dynamic Modeling with QUAKE/W 2007.- 3. Auflage; Calgary, Alberta, Canada, 237 S.

GEO-SLOPE International Ltd. (2008): SIGMA/W Engineering Book – Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W 2007.- 3. Auflage; Calgary, Alberta, Canada, 322 S.

GEO-SLOPE International Ltd. (2008): SLOPE/W Engineering Book - Stability Modeling with SLOPE/W 2007.- 3. Auflage; Calgary, Alberta, Canada, 353 S.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2010). Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen: Daten und Hintergründe. LANUV-Fachbericht 27.

SOFTWARE

COREL GRAPHICS SUITE 11 (2002). Version 11.633, Corel Cooperation, Ottawa, Kanada.

FARO SCENE (2008-2010). Version 4.5-4.7., FARO Scanner Production GmbH, Korntal-Münchingen, Deutschland.

GeoStudio 2007 (2007). Version 7.15, GEO-SLOPE International Ltd. Calgary, Alberta, Kanada.

GRAPHER (2007). Version 7.0.1870, Golden Software Inc., Colorado, USA.

JRC 3D RECONSTRUCTOR 2 (2008-2011). Version 2.2.06-2.7.0.164 (32-bit), Version 2.5.1.38-2.7.0.164 (64-bit), Gexcel - Geomatics & Excellence, Brescia, Italien.

QSCMP (2008). Rongjiang Wang, Geoforschungszentrum Potsdam, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Deutschland.

QSGRN (2008). Rongjiang Wang, Geoforschungszentrum Potsdam, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Deutschland.

SURFER (2003). Version 8.03, Golden Software Inc., Colorado, USA.

SURFER (2011). Version 10.0.500, Golden Software Inc., Colorado, USA.

WEBSEITEN

Deutscher Wetterdienst (www.dwd.de): Klimadatenzentrum

http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_windowLabel=T16602574671148363932656&_urlType=action&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_datenzentren_nkdz abgerufen am 23.9.2011.

Google Maps (www.maps.google.de): Luftbilder Köln
abgerufen am 2.10.2010.

Trimble/Toposys (www.trimble.com): Faserlaserscanner

<http://www.toposys.de/toposys-de/lidar-systems/falcon-faserscanner-und-scanmuster.php?print=true> abgerufen am 27.09.2011.

Uvex (www.uvex-laservision.de): Laserklassen

<http://www.uvex-laservision.de/laserwissen/laser/laserklassen/> abgerufen am 23.09.2011.

Anhang A:

Mittlere Fehler der Registrierung der 3D-Punktwolken

PRAETORIUM

| Referenzpunktwolke | Bewegliche Punktwolke | Mittlerer Fehler (m) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|
| Praetorium014 | Praetorium013 | 0.00100 |
| Praetorium013 | Praetorium012 | 0.00160 |
| Praetorium012 | Praetorium011 | 0.00197 |
| Praetorium014 | Praetorium015 | 0.00127 |
| Praetorium015 | Praetorium016 | 0.00149 |
| Praetorium016 | Praetorium017 | 0.00135 |
| Praetorium017 | Praetorium018 | 0.00105 |
| Praetorium018 | Praetorium019 | 0.00091 |
| Praetorium019 | Praetorium020 | 0.00098 |
| Praetorium020 | Praetorium021 | 0.00096 |
| Praetorium021 | Praetorium022 | 0.00106 |
| Praetorium022 | Praetorium023 | 0.00118 |
| Praetorium023 | Praetorium024 | 0.00110 |
| Praetorium015 | AZ_Praetorium_MB096 | 0.00189 |
| AZ_Praetorium_MB096 | AZ_Praetorium_MB095 | 0.00118 |
| AZ_Praetorium_MB095 | AZ_Praetorium_MB097 | 0.00121 |
| AZ_Praetorium_MB097 | AZ_Praetorium_MB094 | 0.00125 |
| AZ_Praetorium_MB094 | AZ_Praetorium_MB093 | 0.00163 |
| AZ_Praetorium_MB093 | AZ_Praetorium_MB092 | 0.00157 |
| Praetorium024 | Praetorium025 | 0.00104 |
| Praetorium025 | Praetorium026 | 0.00106 |
| Praetorium026 | Praetorium027 | 0.00111 |
| Praetorium027 | Praetorium028 | 0.00131 |
| Praetorium028 | Praetorium029 | 0.00127 |
| Praetorium029 | Praetorium030 | 0.00128 |
| Praetorium030 | Praetorium031 | 0.00127 |
| Praetorium031 | AZ_Praetorium_MB080 | 0.00240 |
| AZ_Praetorium_MB080 | AZ_Praetorium_MB081 | 0.00182 |
| AZ_Praetorium_MB081 | AZ_Praetorium_MB082 | 0.00083 |
| AZ_Praetorium_MB082 | AZ_Praetorium_MB089 | 0.00178 |
| AZ_Praetorium_MB082 | AZ_Praetorium_MB083 | 0.00124 |
| AZ_Praetorium_MB083 | AZ_Praetorium_MB084 | 0.00190 |
| AZ_Praetorium_MB084 | AZ_Praetorium_MB088 | 0.00169 |
| AZ_Praetorium_MB084 | AZ_Praetorium_MB087 | 0.00193 |
| Praetorium030 | AZ_Praetorium_MB074 | 0.00151 |
| AZ_Praetorium_MB074 | AZ_Praetorium_MB085 | 0.00182 |
| AZ_Praetorium_MB074 | AZ_Praetorium_MB086 | 0.00112 |
| AZ_Praetorium_MB074 | AZ_Praetorium_MB073 | 0.00151 |
| AZ_Praetorium_MB074 | AZ_Praetorium_MB072 | 0.00170 |
| AZ_Praetorium_MB074 | AZ_Praetorium_MB075 | 0.00141 |
| AZ_Praetorium_MB075 | AZ_Praetorium_MB076 | 0.00149 |
| AZ_Praetorium_MB076 | AZ_Praetorium_MB071 | 0.00164 |

PRAETORIUM: Fortsetzung

| Referenzpunktwolke | Bewegliche Punktwolke | Mittlerer Fehler (m) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|
| Praetorium031 | Praetorium032 | 0.00107 |
| Praetorium032 | AZ_Praetorium_MB063 | 0.00197 |
| AZ_Praetorium_MB076 | AZ_Praetorium_MB077 | 0.00141 |
| AZ_Praetorium_MB084 | AZ_Praetorium_MB091 | 0.00159 |
| AZ_Praetorium_MB091 | AZ_Praetorium_MB090 | 0.00181 |
| AZ_Praetorium_MB077 | AZ_Praetorium_MB079 | 0.00168 |
| Praetorium013 | AZ_Praetorium_MB062 | 0.00186 |
| AZ_Praetorium_MB062 | AZ_Praetorium_MB061 | 0.00126 |
| AZ_Praetorium_MB061 | AZ_Praetorium_MB060 | 0.00101 |
| AZ_Praetorium_MB060 | AZ_Praetorium_MB059 | 0.00133 |
| AZ_Praetorium_MB059 | AZ_Praetorium_MB058 | 0.00138 |
| AZ_Praetorium_MB058 | AZ_Praetorium_MB057 | 0.00115 |
| AZ_Praetorium_MB057 | AZ_Praetorium_MB056 | 0.00117 |
| AZ_Praetorium_MB056 | AZ_Praetorium_MB055 | 0.00143 |
| AZ_Praetorium_MB055 | AZ_Praetorium_MB054 | 0.00145 |
| AZ_Praetorium_MB054 | AZ_Praetorium_MB053 | 0.00123 |
| Praetorium011 | Praetorium010 | 0.00142 |
| Praetorium010 | Praetorium009 | 0.00158 |
| Praetorium009 | Praetorium008 | 0.00163 |
| Praetorium008 | Praetorium007 | 0.00137 |
| Praetorium007 | Praetorium006 | 0.00145 |
| Praetorium006 | Praetorium005 | 0.00132 |
| Praetorium005 | Praetorium004 | 0.00075 |
| Praetorium004 | Praetorium003 | 0.00143 |
| Praetorium003 | Praetorium002 | 0.00076 |
| Praetorium002 | Praetorium001 | 0.00133 |
| Praetorium003 | AZ_Praetorium_MB043 | 0.00153 |
| AZ_Praetorium_MB043 | AZ_Praetorium_MB044 | 0.00083 |
| AZ_Praetorium_MB044 | AZ_Praetorium_MB045 | 0.00116 |
| AZ_Praetorium_MB045 | AZ_Praetorium_MB046 | 0.00135 |
| AZ_Praetorium_MB046 | AZ_Praetorium_MB047 | 0.00104 |
| AZ_Praetorium_MB047 | AZ_Praetorium_MB048 | 0.00099 |
| AZ_Praetorium_MB048 | AZ_Praetorium_MB049 | 0.00105 |
| AZ_Praetorium_MB049 | AZ_Praetorium_MB050 | 0.00100 |
| AZ_Praetorium_MB050 | AZ_Praetorium_MB051 | 0.00100 |
| AZ_Praetorium_MB051 | AZ_Praetorium_MB052 | 0.00114 |
| Praetorium032 | Praetorium033 | 0.00117 |
| Praetorium033 | Praetorium034 | 0.00100 |
| Praetorium034 | Praetorium035 | 0.00108 |
| Praetorium035 | Praetorium036 | 0.00140 |
| Praetorium036 | Praetorium037 | 0.00121 |
| Praetorium037 | Praetorium038 | 0.00100 |
| Praetorium038 | Praetorium039 | 0.00097 |
| Praetorium039 | Praetorium040 | 0.00120 |
| Praetorium039 | Praetorium041 | 0.00160 |
| Praetorium041 | Praetorium042 | 0.00107 |
| Praetorium035 | AZ_Praetorium_MB064 | 0.00158 |

PRAETORIUM: Fortsetzung

| Referenzpunktwolke | Bewegliche Punktwolke | Mittlerer Fehler (m) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|
| AZ_Praetorium_MB064 | AZ_Praetorium_MB065 | 0.00106 |
| Praetorium033 | AZ_Praetorium_MB066 | 0.00037 |
| Praetorium033 | AZ_Praetorium_MB067 | 0.00087 |
| AZ_Praetorium_MB067 | AZ_Praetorium_MB068 | 0.00156 |
| Praetorium035 | AZ_Praetorium_MB070 | 0.00131 |
| AZ_Praetorium_MB070 | AZ_Praetorium_MB069 | 0.00099 |

Mittlerer Fehler der Georeferenzierung: 0.00433 m

ABWASSERKANAL: Westlicher Abschnitt

| Referenzpunktwolke | Bewegliche Punktwolke | Mittlerer Fehler (m) |
|--------------------------|--------------------------|----------------------|
| AZ_Sewer_20080922_01002 | AZ_Sewer_20080922_02003 | 0.00697 |
| AZ_Sewer_20080922_02003 | AZ_Sewer_20080922_03004 | 0.00106 |
| AZ_Sewer_20080922_03004 | AZ_Sewer_20080922_04005 | 0.00115 |
| AZ_Sewer_20080922_04005 | AZ_Sewer_20080922_05006 | 0.00104 |
| AZ_Sewer_20080922_05006 | AZ_Sewer_20080922_06007 | 0.00127 |
| AZ_Sewer_20080922_06007 | AZ_Sewer_20080922_07008 | 0.00109 |
| AZ_Sewer_20080922_07008 | AZ_Sewer_20080922_08009 | 0.00122 |
| AZ_Sewer_20080922_08009 | AZ_Sewer_20080922_09010 | 0.00117 |
| AZ_Sewer_20080922_09010 | AZ_Sewer_20080922_10011 | 0.00115 |
| AZ_Sewer_20080922_10011 | AZ_Sewer_20080922_11012 | 0.00098 |
| AZ_Sewer_20080922_11012 | AZ_Sewer_20080922_12013 | 0.00115 |
| AZ_Sewer_20080922_12013 | AZ_Sewer_20080922_13014 | 0.00110 |
| AZ_Sewer_20080922_13014 | AZ_Sewer_20080922_14015 | 0.00111 |
| AZ_Sewer_20080922_14015 | AZ_Sewer_20080922_15016 | 0.00181 |
| AZ_Sewer_20080922_15016 | AZ_Sewer_20080922_16017 | 0.00118 |
| AZ_Sewer_20080922_16017 | AZ_Sewer_20080922_17018 | 0.00157 |
| AZ_Sewer_20080922_17018 | AZ_Sewer_20080923_001002 | 0.00094 |
| AZ_Sewer_20080923_001002 | AZ_Sewer_20080923_002003 | 0.00137 |
| AZ_Sewer_20080923_002003 | AZ_Sewer_20080923_003004 | 0.00100 |
| AZ_Sewer_20080923_003004 | AZ_Sewer_20080923_004005 | 0.00124 |
| AZ_Sewer_20080923_004005 | AZ_Sewer_20080923_005006 | 0.00117 |
| AZ_Sewer_20080923_005006 | AZ_Sewer_20080923_006007 | 0.00131 |
| AZ_Sewer_20080923_005006 | AZ_sewer_12012009003 | 0.00109 |

Mittlerer Fehler der Georeferenzierung: 0.0046 m

ABWASSERKANAL: Östlicher Abschnitt

| Referenzpunktwolke | Bewegliche Punktwolke | Mittlerer Fehler (m) |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| AZ_Sewer_20090930_001 | AZ_Sewer_20090930_002 | 0.00103 |
| AZ_Sewer_20090930_002 | AZ_Sewer_20090930_003 | 0.00103 |
| AZ_Sewer_20090930_003 | AZ_Sewer_20090930_004 | 0.00126 |

Keine Georeferenzierung

PORTICUS

| Referenzpunkt wolke | Bewegliche Punkt wolke | Mittlerer Fehler (m) |
|----------------------|------------------------|----------------------|
| AZ_Port_120808_01002 | AZ_Port_120808_02003 | 0.00106 |
| AZ_Port_120808_02003 | AZ_Port_120808_03004 | 0.00150 |
| AZ_Port_120808_03004 | AZ_Port_120808_03005 | 0.00121 |
| AZ_Port_120808_02003 | AZ_Port_120808_05006 | 0.00229 |
| AZ_Port_120808_05006 | AZ_Port_120808_06007 | 0.00148 |
| AZ_Port_120808_06007 | AZ_Port_120808_07008 | 0.00159 |
| AZ_Port_120808_07008 | AZ_Port_120808_08009 | 0.00152 |
| AZ_Port_120808_08009 | AZ_Port_120808_09010 | 0.00173 |
| AZ_Port_120808_09010 | AZ_Port_120808_10011 | 0.00184 |

Mittlerer Fehler der Georeferenzierung: 0.0048 m

AP SIS UND BRUNNEN

| Referenzpunkt wolke | Bewegliche Punkt wolke | Mittlerer Fehler (m) |
|------------------------|------------------------|----------------------|
| upper_part | AZ_Well_20090826_012 | 0.00090 |
| AZ_Well_20090826_012 | AZ_Well_20090826_011 | 0.00140 |
| AZ_Well_20090826_011 | AZ_Well_20090826_010 | 0.00160 |
| AZ_Well_20090826_010 | AZ_Well_20090826_009 | 0.00137 |
| AZ_Well_20090826_009 | AZ_Well_20090826_008 | 0.00108 |
| AZ_Well_20090826_008 | AZ_Well_20090826_007 | 0.00183 |
| AZ_Well_20090826_007 | AZ_Well_20090826_006 | 0.00104 |
| AZ_Well_20090826_006 | AZ_Well_20090826_005 | 0.00078 |
| AZ_Well_20090826_005 | AZ_Well_20090826_004 | 0.00059 |
| AZ_Well_20090826_004 | AZ_Well_20090826_003 | 0.00086 |
| AZ_Well_20090826_003 | AZ_Well_20090826_002 | 0.00078 |
| AZ_Well_20090826_002 | AZ_Well_20090826_001 | 0.00198 |
| upper_part | AZ_Well_20090415_o_010 | 0.00150 |
| AZ_Well_20090415_o_010 | AZ_Well_20090415_o_011 | 0.00120 |
| AZ_Well_20090415_o_010 | AZ_Well_20090415_o_009 | 0.00132 |
| AZ_Well_20090415_o_011 | AZ_Apsis_20101007_001 | 0.00410 |
| AZ_Apsis_20101007_001 | AZ_Apsis_20101007_002 | 0.00199 |
| AZ_Apsis_20101007_002 | AZ_Apsis_20101007_003 | 0.00187 |
| AZ_Apsis_20101007_001 | AZ_Apsis_20101007_006 | 0.00141 |
| AZ_Apsis_20101007_006 | AZ_Apsis_20101007_004 | 0.00210 |
| AZ_Apsis_20101007_006 | AZ_Apsis_20101007_007 | 0.00189 |
| AZ_Apsis_20101007_001 | AZ_Apsis_20101007_005 | 0.00172 |

Mittlerer Fehler der Georeferenzierung: 0.0017 m

HYPOCAUSTE

| Referenzpunktwolke | Bewegliche Punktwolke | Mittlerer Fehler (m) |
|---------------------------|---------------------------|----------------------|
| Tent_Refl | AZ_Hypocaust_20100303_002 | 0.00371 |
| AZ_Hypocaust_20100303_002 | AZ_Hypocaust_20100303_001 | 0.00175 |
| AZ_Hypocaust_20100303_001 | AZ_Hypocaust_20100303_003 | 0.00196 |

Mittlerer Fehler der Georeferenzierung: 0.0051 m

KLOAKE

| Referenzpunktwolke | Bewegliche Punktwolke | Mittlerer Fehler (m) |
|--------------------------|--------------------------|----------------------|
| AZ_Cesspit_20090603001 | AZ_Cesspit_20090409001 | 0.00155 |
| AZ_Cesspit_20090409001 | AZ_Cesspit_20090323001 | 0.00122 |
| AZ_Cesspit_20090323001 | AZ_Cesspit_20090202001 | 0.00117 |
| AZ_Cesspit_20090202001 | AZ_Cesspit_20090126001 | 0.00110 |
| AZ_Cesspit_20090126001 | AZ_Cesspit_20090119001 | 0.00101 |
| AZ_Cesspit_20090119001 | AZ_Cesspit_20090108001 | 0.00106 |
| AZ_Cesspit_20090108001 | AZ_Cesspit_20081208_LOW | 0.00114 |
| AZ_Cesspit_20081208_LOW | AZ_Cesspit_20081208_HIGH | 0.00119 |
| AZ_Cesspit_20081208_HIGH | AZ_Cesspit_20080928_002 | 0.00159 |
| AZ_Cesspit_20080928_002 | AZ_Cesspit_20080928_001 | 0.00148 |
| AZ_Cesspit_20090603001 | AZ_Cesspit_20101219_001 | 0.00121 |
| AZ_Cesspit_20101219_001 | AZ_Cesspit_20101219_002 | 0.00097 |
| Tent_Refl | AZ_Profile_Cesspit_003 | 0.00626 |
| AZ_Profile_Cesspit_003 | AZ_Profile_Cesspit_002 | 0.00283 |
| AZ_Profile_Cesspit_002 | AZ_Profile_Cesspit_001 | 0.00281 |

Mittlerer Fehler der Georeferenzierung: 0.0051 m

MIKWE

| Referenzpunktwolke | Bewegliche Punktwolke | Mittlerer Fehler (m) |
|------------------------|-------------------------|----------------------|
| AZ_Mikveh_20101404_002 | AZ_Mikveh_20101404_001 | 0.00178 |
| AZ_Mikveh_20101404_002 | AZ_Mikveh_20101404_003 | 0.00184 |
| AZ_Mikveh_20101404_002 | AZ_Mikveh_20101404_004 | 0.00162 |
| AZ_Mikveh_20101404_004 | AZ_Mikveh_20101404_005 | 0.00107 |
| AZ_Mikveh_20101404_005 | AZ_Mikveh_20101404_006 | 0.00177 |
| AZ_Mikveh_20101404_006 | AZ_Mikveh_20101404_007 | 0.00096 |
| AZ_Mikveh_20101404_007 | AZ_Mikveh_20090930_004 | 0.00115 |
| AZ_Mikveh_20090930_004 | AZ_Mikveh_20090930_003 | 0.00100 |
| AZ_Mikveh_20090930_003 | AZ_Mikveh_20090930_002 | 0.00080 |
| AZ_Mikveh_20090930_003 | AZ_Mikveh_20090930_001 | 0.00098 |
| AZ_Mikveh_20101404_003 | Azc_Mikveh_28072011_001 | 0.00372 |

Mittlerer Fehler der Georeferenzierung: 0.0015 m

GRABUNGSFELD SÜD

| Referenzpunkt wolke | Bewegliche Punkt wolke | Mittlerer Fehler (m) |
|--------------------------|--------------------------|----------------------|
| AZ_Apsis_20101007_001 | AZ_Mainarea_20090630_003 | 0.00374 |
| AZ_Mainarea_20090630_003 | AZ_Mainarea_20090630_002 | 0.00221 |
| AZ_Mainarea_20090630_002 | AZ_Mainarea_20090630_001 | 0.00126 |
| AZ_Mainarea_20090630_003 | AZ_Basement_Outside_003 | 0.00510 |
| AZ_Basement_Outside_003 | AZ_Basement_Outside_002 | 0.00228 |
| AZ_Basement_Outside_002 | AZ_Basement_Outside_001 | 0.00332 |

Mittlerer Fehler der Georeferenzierung: 0.0017 m

FRAUENSYNAGOGE

| Referenzpunkt wolke | Bewegliche Punkt wolke | Mittlerer Fehler (m) |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Tent_Refl | AZC_WomenSynagogue_20110531_003 | 0.00569 |
| AZC_WomenSynagogue_20110531_003 | AZ_Excavation_20100119_001 | 0.00541 |
| AZC_WomenSynagogue_20110531_003 | AZC_WomenSynagogue_20110531_001 | 0.00165 |
| AZC_WomenSynagogue_20110531_001 | Azc_WomenSynagogue_28072011_001 | 0.00403 |
| AZC_WomenSynagogue_28072011_001 | Azc_WomenSynagogue_28072011_002 | 0.00345 |

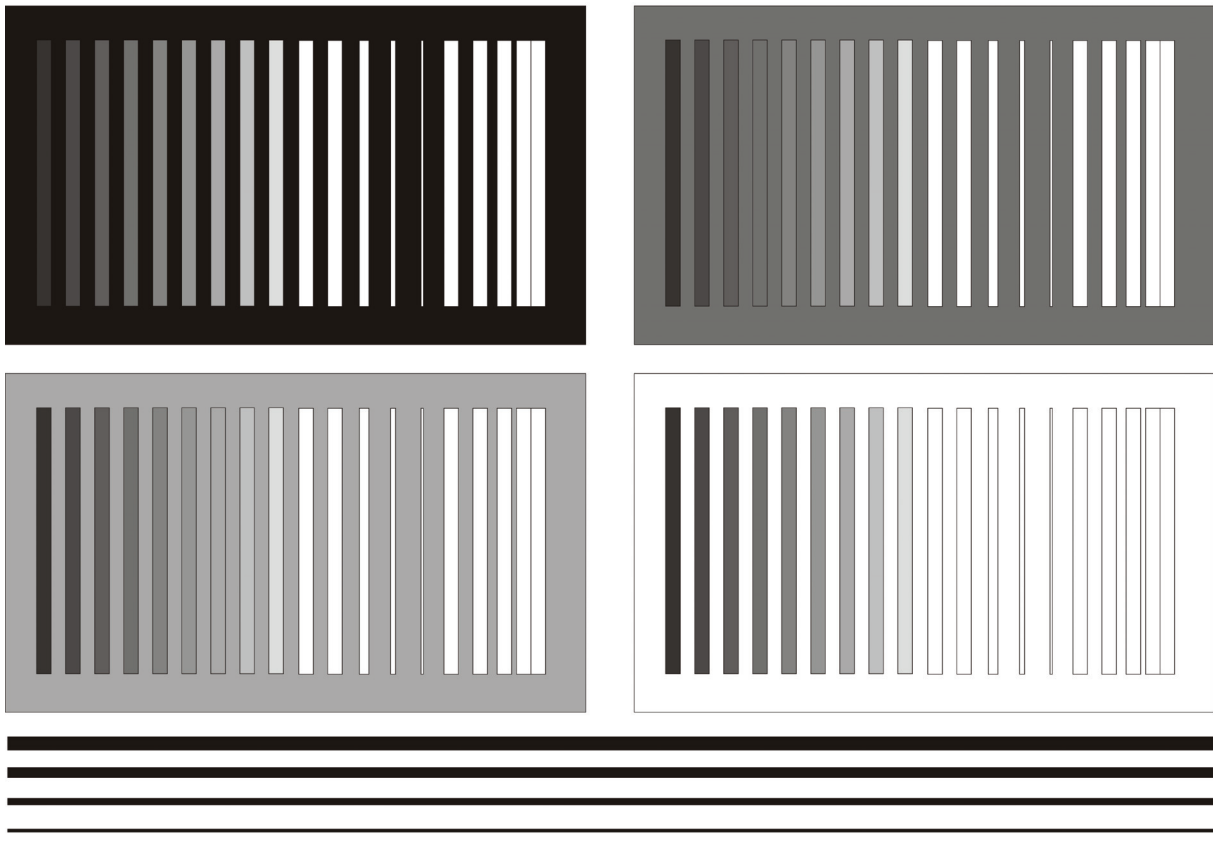
Mittlerer Fehler der Georeferenzierung: 0.0051 m

Anhang B:

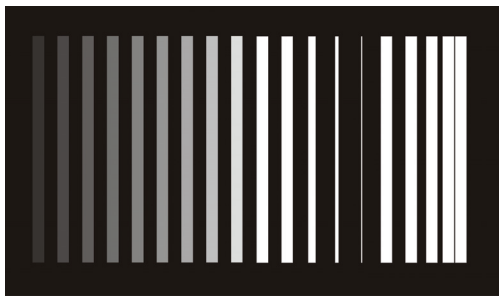
Darstellung der verschiedenen Auflösungsstufen am Beispiel einer Testmessung.

Zur Untersuchung der verschiedenen Auflösungsstufen des FARO PHOTON 80 Phasenlaserscanners wurde eine Testseite mit verschiedenen Streifenmustern aus einer Entfernung von 2.0 m mit einem Auftreffwinkel auf die Mitte der Testseite von 20° zur Horizontalen. Der Scanner war in seiner Höhenlage über dem Zielobjekt positioniert. Im Folgenden sind die Testseite, die Parameter der Testseite sowie die Ergebnisse der Testmessungen dargestellt.

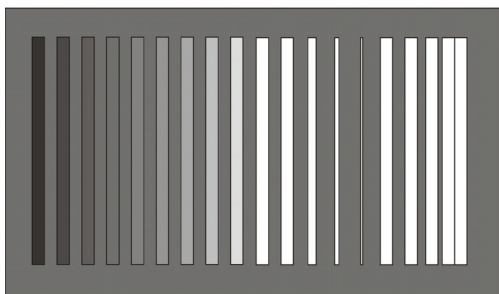
3D Laserscanner Testseite



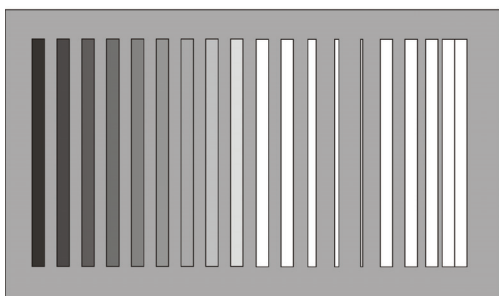
Aufbau der Testseite zur Untersuchung der verschiedenen Auflösungsstufen von 1/16 bis 1/1 des FARO PHOTON 80.



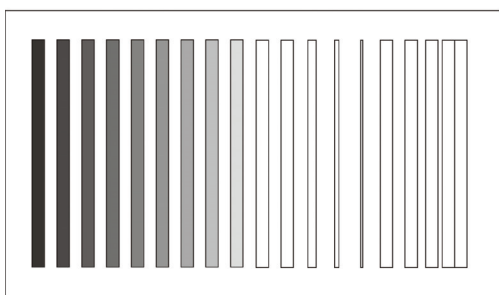
Größe: 120 mm x 70 mm
Grundfarbe Schwarz 100%
Streifen: 3 mm x 55 mm, Abstand: 6 mm
(Mittelpunkt zu Mittelpunkt)
10 Streifen Farbabstufungen: 90%, 80%, 70%, 60%,
50%, 40%, 30%, 20%, 10%, Weiß
4 Streifen: Breitenvariation: 3 mm, 2 mm,
1 mm, 0.5 mm Abstand: 6 mm
5 Streifen Abstandsvariation: 6 mm, 5 mm, 4 mm, 3 mm



Grundfarbe: 60% Schwarz



Grundfarbe: 30 % Schwarz

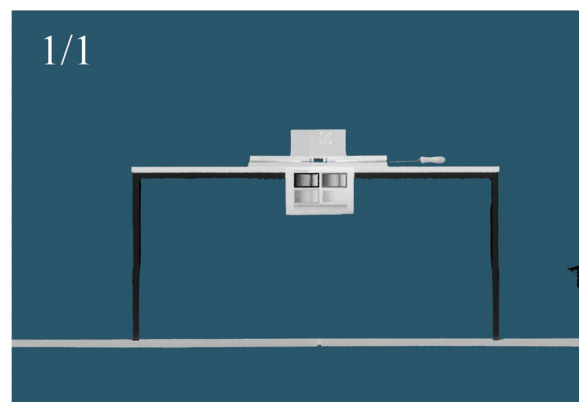
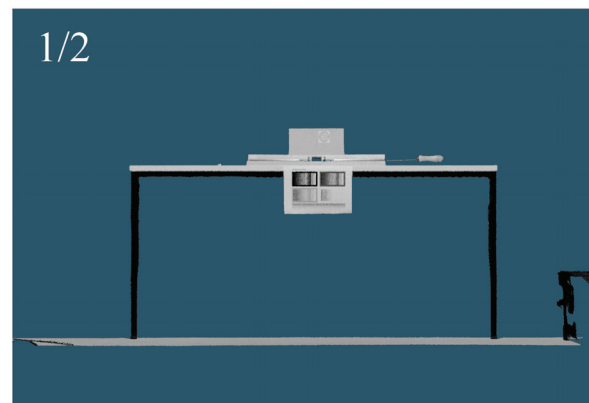
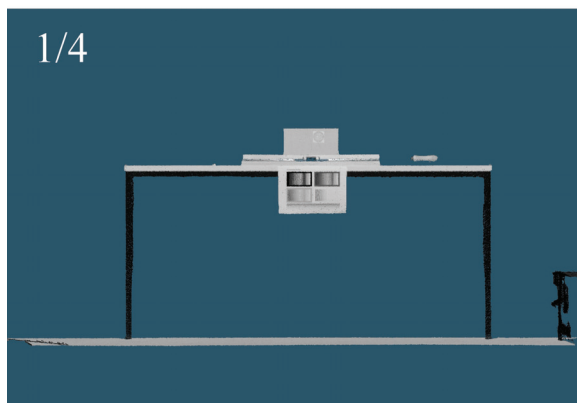
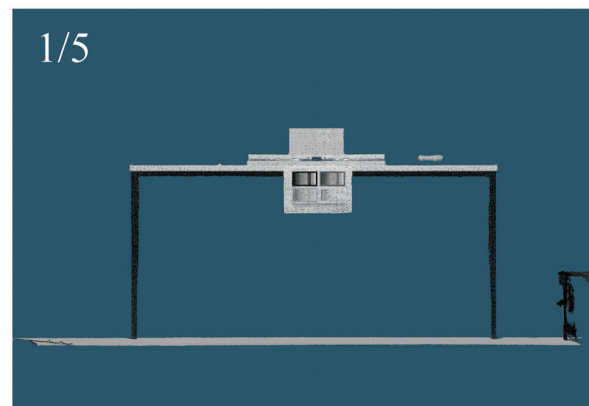
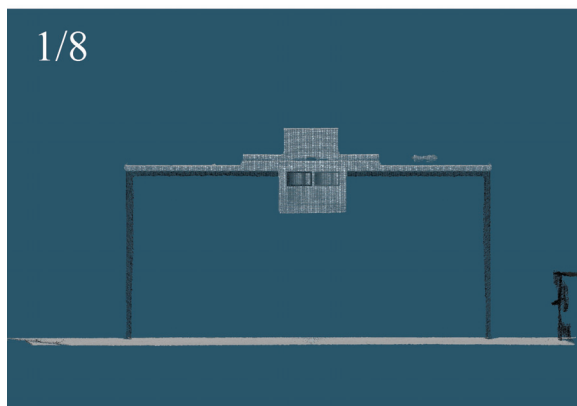
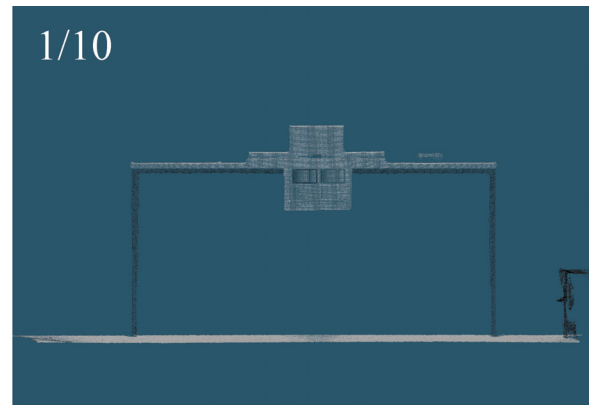
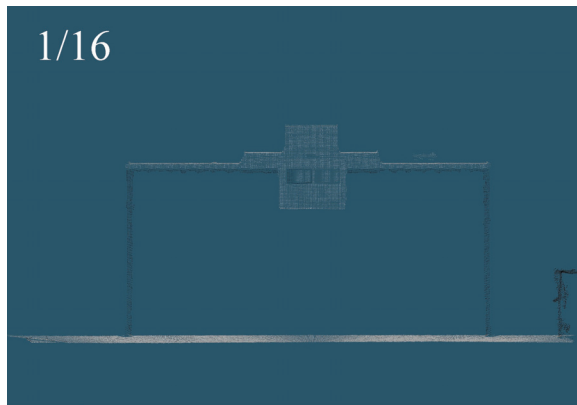


Grundfarbe: Weiß

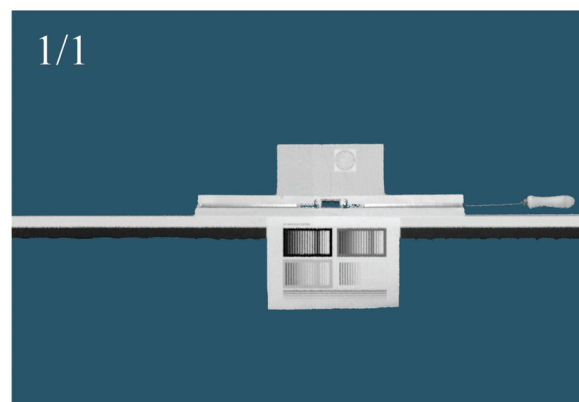
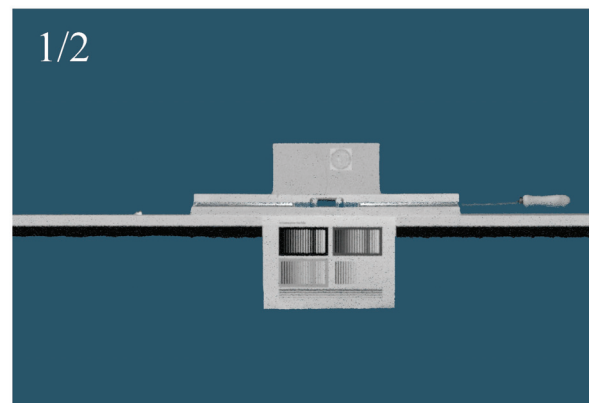
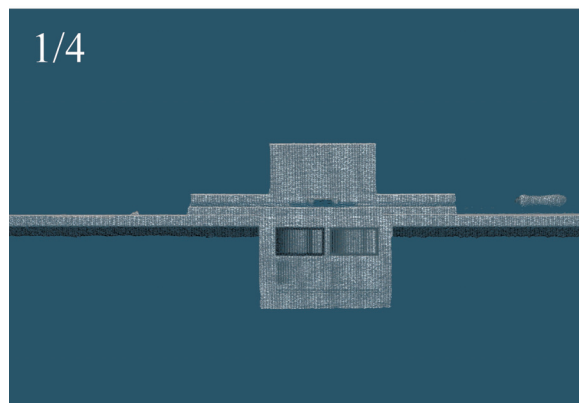
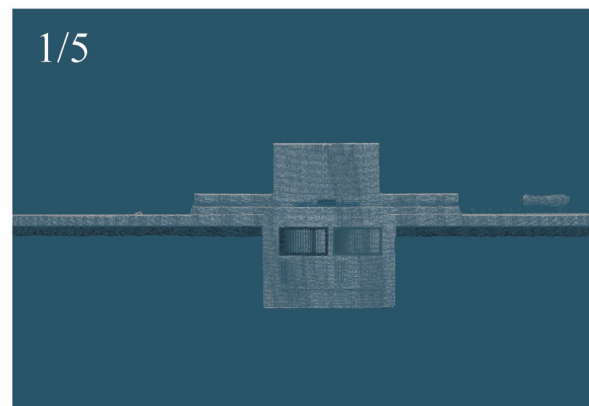
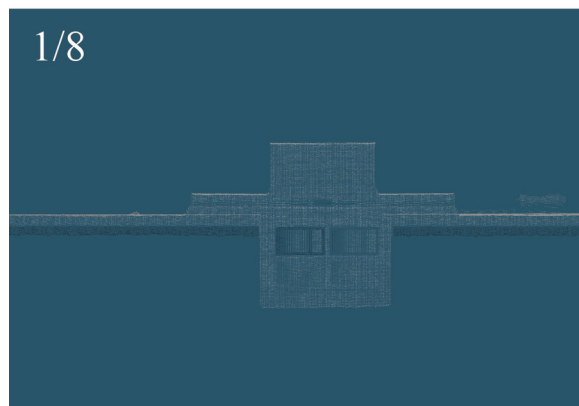
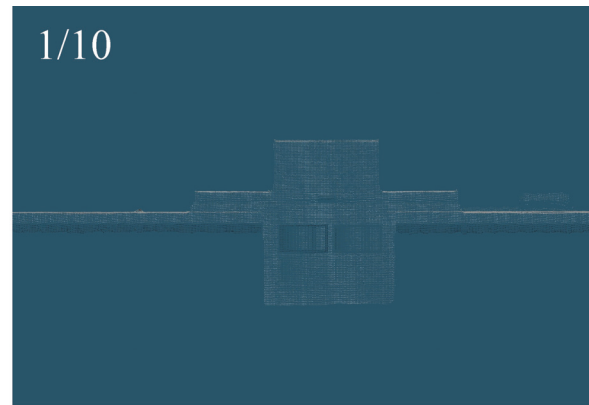
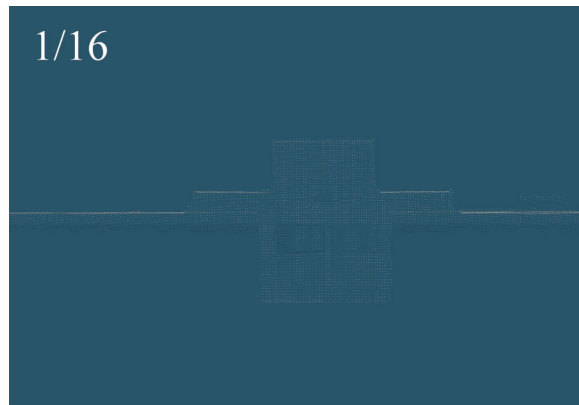


5 Streifen Stärkenvariation: 8 Punkt, 6 Punkt,
4 Punkt, 2 Punkt, Haarlinie

Parameter der einzelnen Sektionen der Testseite



Ansicht der Punktwolke des Testaufbaus in den verschiedenen Auflösungsstufen



Detailansicht des Testaufbaus in den verschiedenen Auflösungsstufen

Anlagen:

ANLAGE I:

„Karte des Praetoriums und des nördlichen Rathausplatzes“

Eine Übersichtskarte mit zeitlicher Einordnung, Bebauung und 3D Laserscandaten.

ANLAGE II:

„Karte des Praetoriums und des nördlichen Rathausplatzes“

Eine Übersichtskarte mit den archäologischen Befundbezeichnungen nach Precht (1973).

ANLAGE III:

„CD Schadensdatenbank“

Die Ergebnisse der Schadensanalyse, zusammengefasst in einer MS Exel Datenbank.
Eine Beschreibung der Inhalte kann der Readme.pdf Datei entnommen werden.

Die „CD Schadensdatenbank“ liegt ausschließlich der gedruckten Fassung der Arbeit bei. Die Dateien der Anlage III sind zudem über den Autor (k.stephan.schreiber@googlemail.com) oder die Erdbebenstation Bensberg (seismo@uni-koeln.de) erhältlich.

Erklärung

Ich versichere, dass ich die von mir vorgelegte Dissertation selbständig angefertigt, die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben und die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen –, die anderen Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, in jedem Einzelfall als Entlehnung kenntlich gemacht habe; dass diese Dissertation noch keiner anderen Fakultät oder Universität zur Prüfung vorgelegen hat; dass sie – abgesehen von unten angegebenen Teilpublikationen – noch nicht veröffentlicht worden ist sowie, dass ich eine solche Veröffentlichung vor Abschluss des Promotionsverfahrens nicht vornehmen werde. Die Bestimmungen der Promotionsordnung sind mir bekannt. Die von mir vorgelegte Dissertation ist von Prof. Dr. K.-G. Hinzen betreut worden.

Teilpublikationen:

Fleischer, C., Hinzen, K.-G. und Schreiber, S. (2010). Laserscanning eines römischen Brunnens in der Archäologischen Zone Köln. *Allgemeine Vermessungs Nachrichten*, **5/2010**, 176-181.

Schreiber, S., Hinzen, K.-G., Fleischer, C. und Schütte, S. (2011). Excavation Parallel Laser Scanning of a Medieval Cesspit in the Archaeological Zone Cologne, Germany. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, eingereicht.

Teile dieser Arbeit wurden auf nationalen und internationalen Fachkonferenzen präsentiert.

Köln, im März 2012



Stephan Schreiber

Lebenslauf

STEPHAN SCHREIBER

1. Persönliche Daten

Kontakt: Emilstrasse 12i, 50827 Köln, Deutschland
Tel. +49/221-9652789, Mobil +49/171-9517033,
Email stephan_schreiber@freenet.de
Nationalität: Deutsch, geboren am 8.3.1980 in Wiesbaden

2. Ausbildung

12/2007: **Diplom** (Gesamturteil: sehr gut)
im Fach Geologie-Paläontologie an der Universität zu Köln
Diplomarbeit: "Quantitative archäoseismologische Untersuchungen am Großen Theater von Larissa (Thessalien, Griechenland)".
Diplomkartierung: "Geologische Kartierung im Bereich Deutschnofen-Petersberg-Weissenstein (Autonome Provinz Bozen - Südtirol, Italien)".

05/2006-08/2006: **Praktikum**
bei der Firma Geofact GmbH, Reichsstrasse 19b, 53125 Bonn

12/2000-12/2007: **Studium**
an der Universität zu Köln im Fach Geologie-Paläontologie

06/1999: **Abitur**
an der Main-Taunus-Schule Hofheim a.Ts. (seit 1990)

3. Beruflicher Werdegang

Seit Juli 2008: **Wissenschaftlicher Mitarbeiter**
im Rahmen des DFG Projektes: „Investigation of the Hypothesis of a Seismogenic Origin for the Structural Damages to Buildings in the Archeological Zone Cologne with Engineering-Geophysical Models”
am Institut für Geologie und Mineralogie Abteilung Erdbebengeologie,
Vinzenz-Palotti- Strasse 26, 51429 Bergisch Gladbach

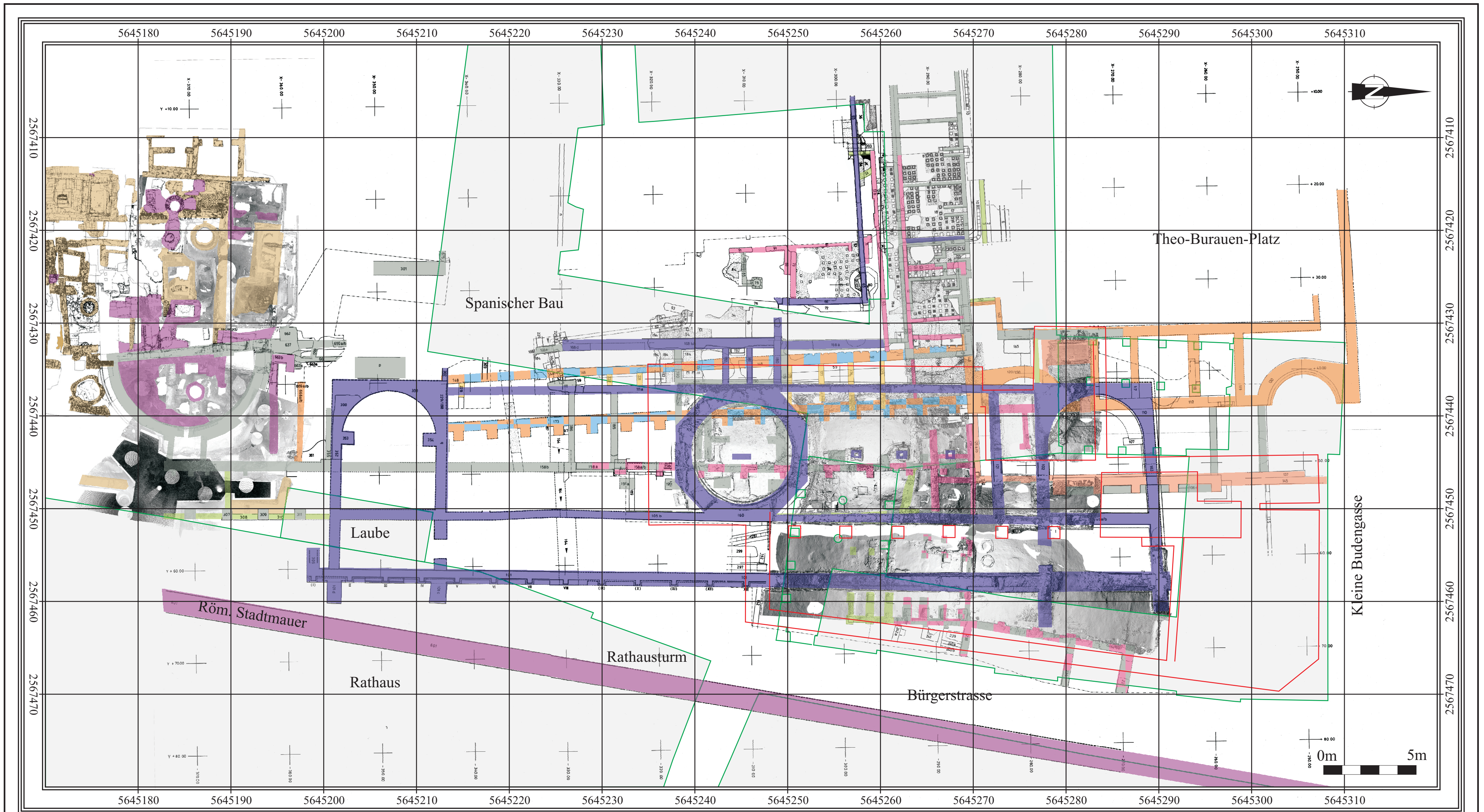
01/2008-06/2008: **Wissenschaftliche Hilfskraft (WHK)**
am Institut für Geologie und Mineralogie Abteilung Erdbebengeologie,
Vinzenz-Palotti- Strasse 26, 51429 Bergisch Gladbach

09/2006-04/2007: **Mitarbeiter im Bereich geophysikalische Prospektion**
der Firma Geofact GmbH, Reichsstrasse 19b, 53125 Bonn

12/2004-12/2007: **Studentische Hilfskraft (SHK)**
am Institut für Geologie und Mineralogie Abteilung Erdbebengeologie,
Vinzenz-Palotti- Strasse 26, 51429 Bergisch Gladbach



Stephan Schreiber



Anlage I: Karte des Praetoriums und des nördlichen Rathausplatzes

Basiskarte Praetorium nach Precht (1972)

Basiskarte Rathausplatz nach Schütte & Gechter (2011)

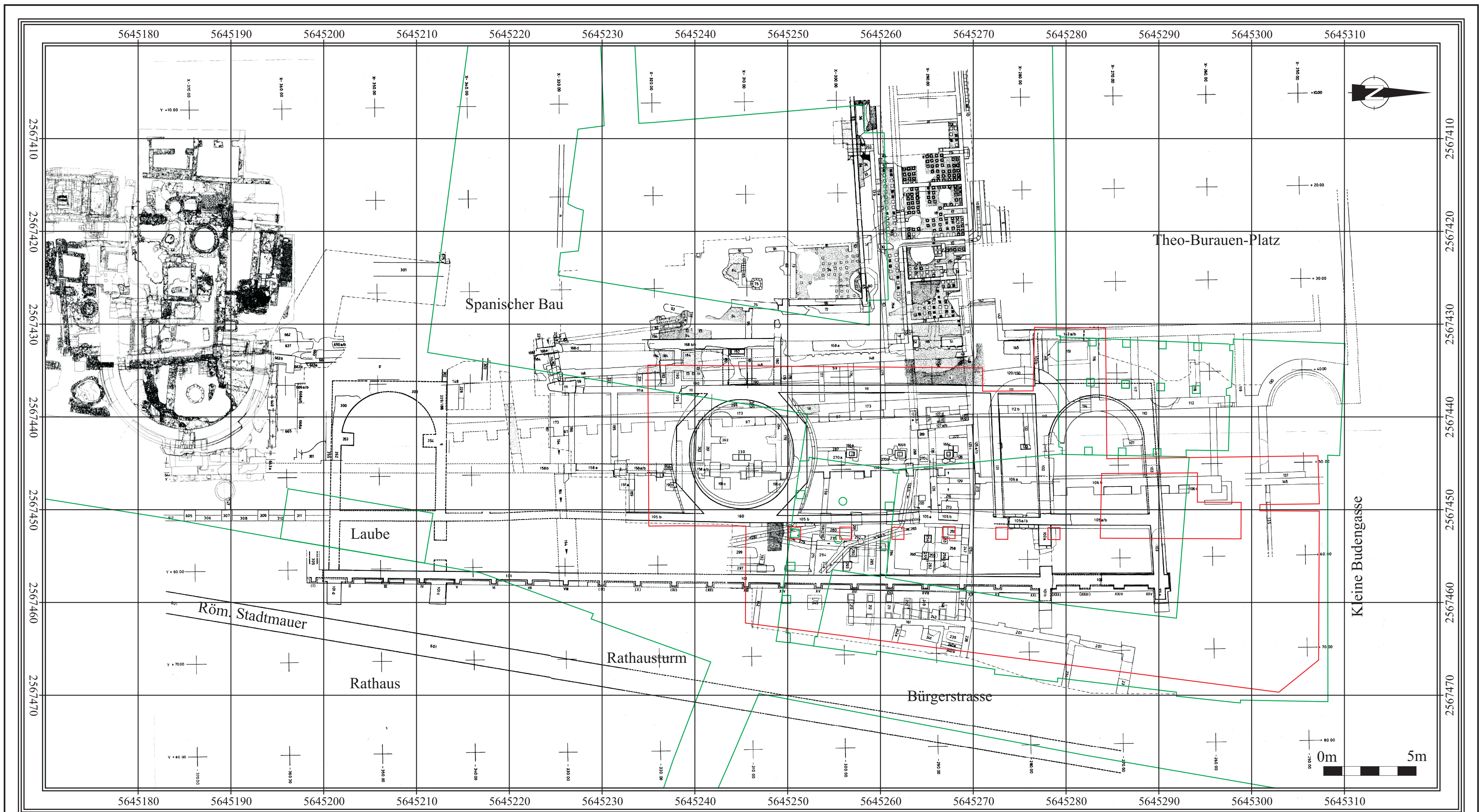
Bebauung nach Deutsche Grundkarte 1:5000, Blatt 5007/23 Köln, Altstadt

Bauphasen des Praetoriums:

| | | | |
|---|---|--|--|
| Periode IV | Periode III,1 | Periode II,3 | Periode II,1 |
| Periode III,2 | Periode II,4 | Periode II,2 | Periode I |

Sonstiges:

| | | |
|---|---|--|
| mittelalterlich (undefiniert) | Moderne Bebauung | Museumsareal "Budengasse" |
| römisch (undefiniert) | Bereiche mit 3D Daten | |



Anlage II: Karte des Praetoriums und des nördlichen Rathausplatzes

Basiskarte Praetorium nach Precht (1972)

Basiskarte Rathausplatz nach Schütte & Gechter (2011)

Bebauung nach Deutsche Grundkarte 1:5000, Blatt 5007/23 Köln, Altstadt

- Moderne Bebauung
- Museumsareal "Budengasse"